



Aalto-yliopisto
Insinöörیتieteiden korkeakoulu

Jyri Lehto

Nivelvarsirobotin testeritarraimen kehittäminen

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 14.4.2016

Valvoja: Professori Petri Kuosmanen

Ohjaaja: Tekniikan lisensiaatti Pekka Kyrenius

Tekijä Jyri Lehto

Työn nimi Nivelvarsirobotin testeritarraimen kehittäminen

Koulutusohjelma Konetekniikka

Pääaine Koneensuunnittelu

Koodi K3001

Työn valvoja Professori Petri Kuosmanen

Työn ohjaaja Tekniikan lisensiaatti Pekka Kyrenius

Päivämäärä 14.4.2016

Sivumäärä 96 ja 6 liitettä (23
sivua)

Kieli suomi

Tiivistelmä

Teollisuudessa robotteja käytetään tuotantovaiheissa, jotka ovat toistuvia, raskaita tai vaarallisia työntekijälle. Robottisovelluksille ominaista on se, että robotin runko on niin sanottu vakio-osa ja sen käyttämää työkalua kustomoidaan sovelluskohteen vaatimalla tavalla.

Tässä työssä suunniteltiin robotin käyttämä työkalu; testeritarrain. Tarraimen toimintoihin kuului piirikortin käsittely, In-Circuit testauksen mekaanisten vaiheiden suorittaminen sekä piirikortin koteloiminen. Työn tavoitteena oli toimivan prototyypin luominen ja saada kokemusta robotin työkalusuunnittelusta. Tuotekehityksen aikana haluttiin myös kiinnittää erityistä huomiota siihen, mitkä ovat työkalun toiminnan kannalta kriittisiä osia.

Työn suunnittelu toteutettiin käyttämällä perinteisiä systemaattisen konseptisuunnittelun menetelmiä. Tiedonhaun, markkinatutkimuksen ja erilaisten aivoriikityyppisten menetelmien avulla päästiin konstruktion suunnitteluun, joka eteni iteroimalla ja arvioimalla rakennetta vaiheittain.

Prototyypin valmistus aloitettiin, kun konstruktio todettiin tietokonemallien perusteella toimivaksi. Valmistusvaiheessa hyödynnettiin perinteisten valmistusmenetelmien lisäksi myös 3d-tulostusta, joka todettiin erityisen toimivaksi osissa, joihin oli tarvetta tehdä muutoksia vielä valmistusvaiheen aikana. Lopputuloksena saatiin luotua robotilla käytettävä testeritarrain, jossa piirikortin siirtelyyn käytetään sekä pihtityyppistä tarrainta, että alipaineella toimivaa kosketuksetonta tarrainta. IC-testauksen mekaaninen suoritus toteutettiin ottamalla tarkasti kohdistettu kontakti piirikorttiin testineuloilla. Käytännön tason testausta prototyypille suoritettiin jo valmistusvaiheessa ilman robottia ja myöhemmin kokonaisuutena nivelvarsirobotin kanssa.

Testeritarraimelle asetetut tavoitteet saavutettiin ja lopputuloksena saatiin esittelykelpoinen kappale yritykselle. Prototyypin lisäksi saatiin yritykselle kerättyä tietoa ja käytännön tason taitoja robotiikkaan ja työkalusuunnitteluun liittyen. Kokonaisuutena suunnitteluprosessi kehitti koko yrityksen tuotekehityskäytäntöjä. Konseptia on tarkoitus tulevaisuudessa jatkokehittää muun muassa testeritarraimen lisättävillä antureilla ja hiomalla rakenteellisia ratkaisuja. Ennen kaikkea, työ toimii avauksena yrityksen toimialan laajentamiseksi robotiikkaan ja siihen liittyvien oheislaitteiden suunnitteluun.

Avainsanat tuotekehitys, tarrain, IC-testaus, robotiikka

Author Jyri Lehto

Title of thesis The development of an articulated arm robot tester gripper

Degree programme Mechanical Engineering

Major Machine design

Code K3001

Thesis supervisor Professor Petri Kuosmanen

Thesis advisor(s) Pekka Kyrenius, Lic.Sc. (Tech.)

Date 14.4.2016

Number of pages 96 and 6
appendices (23 pages)

Language Finnish

Abstract

In industry robots are used in production phases which are repetitive, heavy or dangerous for a worker. It is typical for these robot applications that frame of the robot is standard part and the robot tool is customized for the application requirements.

This thesis was to design a tool for the robot manipulator; the tester gripper. Functions of the gripper consist of handling the printed circuit board, mechanical part of In-Circuit testing and encasing the PCB. Goals for this study were to create the workable prototype and gather experience of the robot tool design process. During the product development, was also intended to pay particular attention to what are the critical parts of the functioning of the tool.

Designing the work was carried out by using the traditional concept of systematic design methods. Information search, market research and the different types of brainstorming method were used to reach the phase of construction design, which proceeded by iteration and by evaluating the structure.

After the construction was evaluated fully functioning on the basis of computer models, the manufacturing phase was started. In addition to the traditional manufacturing methods, also the 3D printing was utilized. The 3D printing was found the particularly effective manufacturing method for the parts which was the need to make changes during the manufacturing phase. As a result, the tester gripper included the traditional pneumatic gripper and the non-contact vacuum gripper for handling the printed circuit board and testing probes for IC-testing. Tests for the individual parts were performed during the manufacturing and later the whole construction was tested with the robot.

The goals of this study were reached and as a result the presentable version of the prototype was created. In addition to information and practical level skills in robotics and tool design was gathered to the company. The design process developed company's product development practices. The concept is intended to further develop in the future by adding sensors and adjusting the structure. Above all, this study is entry to extend the knowledge of the company in the field of robotics and robotic tool design.

Keywords product development, gripper, IC testing, robotics

Alkusanat

Tämä diplomityö tehtiin P. Lindfors Engineering Oy:lle ja työn tarkoituksena oli kerätä yritykselle tietoa ja kokemusta robottien työkalusuunnitteluun liittyen.

Työn valvojaa Petri Kuosmasta ja työn ohjaajaa Pekka Kyreniusta haluan kiittää neuvoista, mielenkiinnosta työtä kohtaan ja mahdollisuudesta hyödyntää koulun robottia. Kiitokset myös Jukka Helteelle vaivannäöstä ja robotin ohjelmoinnista.

Kiitän P. Lindfors Engineering Oy:tä ja Patrick Lindforsia mahdollisuudesta diplomityön tekemiseen, teknisestä ohjauksesta ja työn rahoituksesta. Kiitokset myös muille työn etenemiseen ja valmistumiseen myötävaikuttaneille henkilöille.

Espoo 14.4.2016

Jyri Lehto

Sisällys

Tiivistelmä

Abstract

Alkusanat

Sisällys

Merkinnät

Lyhenteet

1	Johdanto	1
1.1	Työn tausta	1
1.2	Tutkimusongelma	2
1.3	Työn tavoitteet	2
1.4	Rajaukset	3
1.5	Menetelmät	3
2	Konseptiin liittyvä teoreettinen tausta	4
2.1	Robotisoidut tuotantosolut	4
2.1.1	Yleisesti roboteista	4
2.1.2	Tuotantosolut	7
2.1.3	Sovelluskohteet	9
2.1.4	Kokoonpanoautomaatio	9
2.2	Nivelvarsirobotit	11
2.2.1	Kuka KR 6 R900 sixx	11
2.3	Tarraimet	15
2.3.1	Yleisesti tarraimista, niiden suunnittelusta ja hankinnasta	15
2.3.2	Tarrainvaihtoehdot	20
2.4	Elektroniikan laadunvalvonta ja testaus	24
2.4.1	In-Circuit testaus yleisesti	24
2.4.2	Testauksessa käytettävä mekaniikka	25
3	Konseptisuunnittelun ja tuotekehityksen menetelmät	28
3.1	Systemaattisen konseptisuunnittelun vaiheet	28
4	Tarraimen konseptisuunnittelu	37
4.1	Yrityksen konseptille asettamat tavoitteet ja rajaukset	37
4.2	Tiedonhaku ja markkinatutkimus	37
4.3	Vaatimuslistan luominen	38
4.3.1	Vaatimukset	39

4.4	Abstrahointi.....	40
4.5	Toimintorakenne	41
4.6	Teknisten ratkaisujen hakeminen osatoiminnoille	42
4.7	Kokonaisratkaisut.....	42
4.8	Kokonaisratkaisujen arviointi ja valinta.....	43
5	Prototyypin suunnittelu ja valmistus.....	49
5.1	Yrityksen asettamat tavoitteet ja rajaukset prototyypin suhteen.....	49
5.2	Prototyypin rakenne	49
5.2.1	Runkorakenne	49
5.2.2	Pneumatiikka	52
5.2.3	IC-testausmekaniikka.....	58
5.2.4	Tarraimen pihtien muotoilu	59
5.2.5	Paletit ja kotelo	61
5.3	Valmistus.....	64
5.4	Kokoonpano	72
6	Robotisoidun tuotantosolun käyttöönotto	76
6.1	Solun layout	76
6.2	Asennus robottisoluun.....	77
6.3	Ohjelmointi	78
6.4	Työsykli.....	79
7	Tuotteen ja konseptin testaus	84
7.1	Testauksen tavoitteet.....	84
7.2	Testiasettelu.....	84
7.3	Testin tulokset	85
7.4	Havainnot ja johtopäätökset.....	87
8	Pohdinnat	89
8.1	Konseptin toimivuus yleisesti	89
8.2	Onnistuminen asetettujen tavoitteiden suhteen	89
8.3	Jatkotoimenpiteet	90
9	Yhteenveto	91
	Lähdeluettelo	93
	Liiteluettelo.....	96
	Liitteet	
	Liite 1	Morfologinen laatikko. 1 sivu.
	Liite 2	Robottisolun layout. 1 sivu.
	Liite 3	Testeritarraimen kokoonpanopiirustus. 1 sivu.

Liite 4	Testeritarraimen koneistuspiirustukset. 6 sivua.
Liite 5	Ohjelmakoodin suoritusosa. 10 sivua.
Liite 6	Ohjelmakoodin dataosa. 4 sivua.

Merkinnät

F_j	[N]	yksittäisen testineulan jousivoima oletusiskupituudella
F_{pt}	[N]	pihtitarraimelta vaadittu tartuntavoima
F_{st}	[N]	syklonitarraimelta vaadittu tartuntavoima
F_{tn}	[N]	testineulojen muodostama kokonaisvoima
a_r	[m/s ²]	robotin kiihtyvyys pysäytystilanteessa
g	[m/s ²]	putoamiskiihtyvyys
k_{pt}	[]	varmuuskerroin pihtitarraimen tartuntavoimalle
k_{st}	[]	syklonitarraimen tartuntavoiman varmuuskerroin
m	[kg]	piirikortin massa
n_{tn}	[]	testineulojen kokonaismäärä
p_r	[MPa]	robotin pneumatiikkajärjestelmän maksimipaine
p_s	[MPa]	syklonitarraimen maksimi käyttöpaine
r	[m]	robotin ulottuvuussäde ääriasentoon ojentautuneena
s	[mm]	syklonitarraimen ja piirikortin välinen etäisyys tartunnassa
t	[s]	robotin 1. nivelen pysäytykseen kuluva aika
v_k	[m/s]	robotin kehänopeus ääriasennossa
μ	[]	kitkakerroin pihtitarraimen ja piirikortin välillä
v_α	[°/s]	robotin 1. nivelen kiertymänopeus

Lyhenteet

ABS	akryylinitriilibutadienistyreeni; muovilaatu
CEM	Lasikuitu-epoksi-komposiitti (engl. <i>Composite Epoxy Material</i>)
DFA	suunnittelu kokoonpanoa varten (engl. <i>Design for Assembly</i>)
DFM	suunnittelu valmistusta varten (engl. <i>Design for Manufacturing</i>)
IC-testaus	piirikortin ja sen komponenttien toiminnan varmistava testaus (engl. <i>In-Circuit Testing</i>)
PCB	piirilevy (engl. <i>Printed Circuit Board</i>)
PLA	polylaktidi; muovilaatu, biohajoava termoplastinen alifaattinen polyesteri
SCARA	valikoivasti taipuva kokoonpanorobottikäsi (engl. <i>Selective Compliance Assembly Robot Arm</i>)
SFS	Suomen Standardisoimisliitto SFS ry
TRIZ	teoria kekseliäästä ongelmanratkaisusta (ven. <i>teoriya resheniya izobretatelskikh zadach</i>)
VDI	saksalaisten insinöörien liitto (saks. <i>Verein Deutscher Ingenieure</i>)

1 Johdanto

Tässä luvussa käydään läpi työn taustoja ja tutkittavaa ongelmaa. Näiden lisäksi esitellään työn tavoitteet ja niihin liittyvät rajaukset. Lopuksi esitellään menetelmät joilla tutkittavaa ongelmaa selvitettiin ja millä keinoin haluttuihin tavoitteisiin päästiin.

1.1 Työn tausta

Suomessa otetaan uusia teollisuusrobotteja vuosittain käyttöön noin 300 kappaletta [Suomen Robotiikkayhdistys ry 2012, s. 1]. Näitä robotteja käytetään eri teollisuuden aloilla muun muassa kappaleenkäsittelyyn, hitsaukseen, kokoonpanoon, mittaukseen, pintakäsittelyyn, työstöön ja erilaisissa puhdistussovelluksissa. Teollisuudessa robotiikalla ja tuotantovaiheiden automaatiolla pyritään lisäämään tuotantomääriä, vähentämään käsin tehtävän työn määrää toistuvissa ja ihmiselle vaarallisissa työvaiheissa sekä tasoittamaan manuaalisesta työstä aiheutuvia laadunvaihteluja. Robottien monipuolisuus ja muokattavuus mahdollistaa jopa täysin ilman manuaalista käsittelyvaihetta toimivia tuotantolinjoja ja tehtaita. Näissä tapauksissa ihmisen tehtäväksi jää usein ainoastaan prosessin valvonta virhetilanteiden varalta.

Robottien hintakehitys on avannut mahdollisuuden myös pienemmille yritykselle investoida erityisesti tuotannon automaatioon. Nykyaikaisten robottien joustava ja intuitiivinen ohjelmointi mahdollistaa myös lyhyet asetusajat, mistä on etua esimerkiksi piensarjatuotannossa.

Roboteilla on olemassa erilaisia runkorakenteita erilaisiin sovelluksiin. Kaikkia näitä kuitenkin yhdistää se, että runkorakennetta harvoin modifioidaan käyttökohteen mukaan, vaan tarjolla on valmiita peruskokoonpanoja. Esimerkiksi automatisoitu kappaleenkäsittely, hitsausprosessi tai koneistus voitaisiin toteuttaa samanlaista robotin perusrunkoa käyttäen. Muuttuvana osana toimii robottiin kiinnitettävä työkalu, joka voi sovelluksesta riippuen olla esimerkiksi tarrain, hitsauspistooli tai pyörivä jysinterä. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että tuotantosolua varten hankitaan robotin perusrunko ohjauksineen ja robottiin kiinnitettävä työkalu suunnitellaan sovelluksen mukaan mittatilaustyönä.

Robottien suorittamien liikkeiden tarkkuus mahdollistaa hyvän ja tasaisen laadun tuotannossa. Tämä vaatii toisaalta korkealaatuista tekniikkaa robotin ja sen käyttämän työkalun suhteen. Robotin toiminnasta voidaan tehdä mukautuvampaa ja joustavampaa, mikäli robotti saa jonkinlaista dataa ympäristöstä ja työkaluista. Käytännössä tämä tarkoittaa esimerkiksi erilaisten antureiden ja konenäkösovellusten liittämistä robottiin, joka lisää järjestelmän hankintakustannuksia. Ilman minkäänlaista takaisinkytkentää toimivien robottien toimintavarmuus tulee varmistaa muilla keinoin, esimerkiksi

rakenteellisilla ratkaisuilla tuotantosolussa tai käytettävässä työkalussa. Tämä asettaa omat haasteensa suunnittelun suhteen.

Tuotantolinjoihin kuuluu osana yleensä myös laadunvalvonta, joka saattaa valmistettavasta tuotteesta riippuen toistua useammassa vaiheessa. Sarjavalmisteisissa tuotteissa toistuva testausvaihe on potentiaalinen automatisoinnin kohde. Mikäli testausprosessi voidaan yhdistää kappaleenkäsittelyyn ja kokoonpanoon, saadaan tuotantoprosessia ja tuotteen läpimenoaikaa lyhennettyä. Monien toisistaan eroavien työvaiheiden suorittaminen yhdellä robotilla luo haasteen robotin käyttämän työvälineen suhteen.

Jokaiseen robotti-investointiin kuuluu siis siihen liitettävä työväline ja robotiikan yleistyessä syntyy kasvava tarve näiden suunnittelulle. Tämä luo perustan tässä työssä esiteltävälle tutkimukselle.

1.2 Tutkimusongelma

Tutkimus on tehty P. Lindfors Engineering Oy:ssä, joka on Espoossa sijaitseva suunnittelutoimisto, jonka päätoimiala on kone- ja prosessisuunnittelu pääasiassa elektroniikkateollisuuden tarpeisiin.

Tutkimus rakentuu yrityksessä valmistellun konseptin ympärille, johon sisältyy sähkömekaanisen tuotteen kokoonpano ja testaus nivelvarsirobottiin liitettävän työkalun avulla. Tutkimuksessa selvitetään konseptin yleinen toimivuus, sekä sen etuja ja haittapuolia manuaalisesti suoritettavaan tuotanto- ja testausprosessiin nähden. Tutkimukseen liittyy myös robotisoidun tuotantosolun käyttöönottoon ja toimintaan liittyvien ongelmakohtien kartoitus. Käytännön työn kautta saadaan selvitettyä myös robottityökalun suunnitteluun ja toteutukseen liittyviä haasteita.

1.3 Työn tavoitteet

Työn tavoitteena on suunnitella ja valmistaa nivelvarsirobotissa käytettävä työkalu, jolla voidaan sekä käsitellä että suorittaa laadunvalvontaa kokoonpantaville sähkömekaanisille tuotteille. Työkalun prototyypillä ja käytössä olevalla nivelvarsirobotilla suoritetaan käytännön testejä konseptin toimivuuden varmentamiseksi. Käytännön testien avulla ja työsykliä tarkkailemalla on tarkoitus selvittää ja havainnoida konseptiin liittyviä ongelmia ja sen tuomia etuja manuaalisesti suoritettavaan prosessiin nähden.

Käytännön projektin kautta on tarkoitus myös kerätä tietoa suunnitteluprosessista ja kehittää tämän avulla yrityksen tuotekehityskäytäntöjä. Työ toimii samalla avauksena yrityksen toimialan laajentamiseksi robotiikkaan. Yrityksen kannalta oleellisin asia on

kuitenkin kartoittaa robotiikkaan liittyvien työkalujen suunnittelun vaatimia resursseja ja pohtia liikeidean järkevää käytännön toteutusta ja liiketoimintamallia.

1.4 Rajaukset

Työn tarkoituksena ei ole luoda lopullista konseptia, vaan ainoastaan havainnoida siihen liittyviä toimintoja ja selvittää sen luomiseen vaadittavia resursseja. Ajatuksena ei ole myöskään luoda markkinoille valmista tuotetta, vaan luoda pohja mahdolliselle jatkokehitykselle.

Prototyypin valmistamisessa pyritään myös painottamaan pikavalmistusmenetelmien käyttöä, niiltä osin kuin se on mahdollista. Yrityksellä on käytössään pikavalmistuslaitteita ja osana työtä on tarkoitus päästä hyödyntämään niiden tarjoamaa potentiaalia ja kustannustehokkuutta.

1.5 Menetelmät

Kokonaisuudessaan tutkimus rakentuu käytännön suunnitteluprojektin ympärille, jonka toteuttamiseen on tarkoitus käyttää yleisesti tunnettuja koneensuunnittelumenetelmiä ja yleisesti käytössä olevia suunnittelutyökaluja- ja ohjelmistoja. Laskennassa pyritään hyödyntämään monipuolisesti käytössä olevia ohjelmistoja ja suunnitteluvaiheessa luotuja 3d-malleja siltä osin kuin katsotaan tarpeelliseksi.

Suunnitteluprosessin etenemistä tarkkaillaan ja siitä kerätään tietoa yrityksen tuotekehityskäytäntöjen luomiseksi. Tämä tapahtuu säännöllisillä työn etenemistä kartoittavilla tapaamisilla ja yrityksen koko henkilöstön kesken tapahtuvilla ideointiin ja ongelmanratkaisuun keskittyvillä ideariihillä

Konseptin käyttöönottoa ja toimivuutta tutkitaan nivelvarsirobotilla ja siihen liitettävällä työkalun prototyypillä. Tämä tapahtuu käyttöönottoprosessia havainnoimalla, erilaisilla käytännön testeillä ja lopullisen työsyklin toimivuutta testaamalla. Testeistä kirjataan tulokset ja näiden pohjalta luodaan johtopäätökset konseptin yleisestä toimivuudesta, eduista ja haitoista manuaaliseen prosessiin nähden.

2 Konseptiin liittyvä teoreettinen tausta

Tämä luku käsittelee kehitettävään konseptiin ja sen suunnitteluun liittyvää teoriaa. Robotiikan osalta käydään läpi yleisiä asioita, tuotantosoluja, kokoonpanoautomaatiota ja muutamia käytännön sovellusesimerkkejä. Tarrainten suhteen käsitellään niiden suunnitteluun liittyviä seikkoja ja käydään läpi erilaisia tarraimissa käytettyjä teknisiä ratkaisuja ja periaatteita. Lopuksi käsitellään elektroniikan laadunvalvontaa ja testausta keskittyen testineuloilla tapahtuvaan In-Circuit- testaukseen.

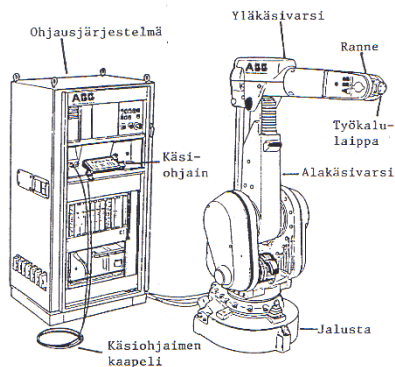
2.1 Robotisoidut tuotantosolut

Tässä luvussa käsitellään yleisesti robotiikkaa ja käydään läpi erilaiset robottityypit. Tuotantosolujen osalta käsitellään niiden suunnitteluun liittyviä yleisiä piirteitä ja muutamia käytännön esimerkkejä teollisuudesta. Kokoonpanoautomaatioon liittyen tuodaan esiin muutamia peruseriaatteita tuotantoon ja tuotteisiin liittyen.

2.1.1 Yleisesti roboteista

Standardit määrittelevät teollisuusrobotin seuraavasti. ”Teollisuuden automaatio-sovelluksissa käytettäväksi tarkoitettu automaattisesti ohjattu, uudelleen ohjelmoitavissa oleva monikäyttöinen käsittelylaite, jonka akseleista vähintään kolme on ohjelmoitavissa ja joka voi olla kiinteästi asennettu tai liikkuva”. [SFS-EN ISO 10218-1 2011, s.12]


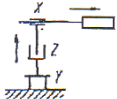


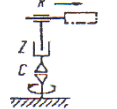


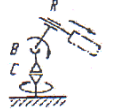

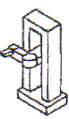
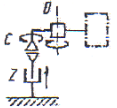


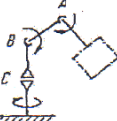


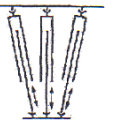

Robottijärjestelmään kuuluu robotin rungon lisäksi ohjauslaitteisto ja robotin käyttämä työväline. Kuvassa 1 on esitetty tyypillinen teollisuusrobotti ohjausjärjestelmineen. Ohjausjärjestelmän tehtävänä on hallita robotin liikkeitä muuttamalla robotin ohjelmaan kirjatut käskyt robotin akseleiden liikekäskyiksi. Ohjausjärjestelmä myös vastaanottaa tietoa robotin akseleiden asemasta ja toimilaitteiden tilasta. Tällöin kyseessä on takaisinkytketty järjestelmä. [Kuivanen 1999, s.34]



Kuva 1: Tyypillinen teollisuusrobotti ja ohjausjärjestelmä. [Kuivanen 1999, s.13]

Robottiin voi olla kytketty myös antureita, joilla robotti havainnoi ympäristöä tai työkappaleita ja muuttaa liikeratojaan antureilta saatavan tiedon perusteella. Tällöin kyseessä on adaptiivinen ohjaus, mikä lisää robotin toiminnan joustavuutta. Adaptiivisen ja takaisinkytketyn ohjauksen ero on robotiikassa häilyvä. Robotin omien akseleiden takaisinkytkennästä saatavan datan avulla voidaan parantaa robotin liikerata- ja paikoitustarkkuutta jolloin voidaan puhua jo adaptiivisesta järjestelmästä. Ohjauksen mukautuvuuden taso voi olla siis hyvinkin vaihteleva. [Pitkälä 2006, s.43]

Kuvassa 2 on esitelty yleisimpiä teollisuusrobottien rakenteita. Rakenteet voidaan jakaa rakenteen mukaan kahteen pääryhmään. Robotit, joissa tukivarret on kytketty peräkkäin, ovat rakenteeltaan kinemaattisesti avoimia. Rinnakkain kytketyt rakenteet ovat kinemaattisesti suljettuja. Nykyään teollisuusroboteista suurin osa on rakenteeltaan kinemaattisesti avoimia. Näiden etuna on suuri ulottuvuus, mutta peräkkäinen rakenne on huono kuormankantokyvyn suhteen. Kinemaattisesti suljetut rakenteet ovat huomattavasti tukevampia, koska kuorma jakautuu usean tukivarren kesken. Työalue taas vastaavasti pienenee. Suljetun rakenteen robotteja voidaan toteuttaa suhteellisen kevyillä rakenteilla, jolloin hitausmassa on pieni ja robotin työliikkeistä saadaan nopeita, käytännössä kertalukua suurempia kuin peräkkäisillä tukivarsilla toteutetuilla roboteilla. [Kuivanen 1999, s.16-17]

Nimitys pääakseleiden mukaan	Rakenne	Kinemaattinen kaavio	Työalue
Suorakulmainen robotti			
Sylinterirobotti			
Napa-koordinaatistorobotti			
Scara-robotti			
Kiertyvänivelinen robotti			
Rinnakkaisrakenteinen robotti			

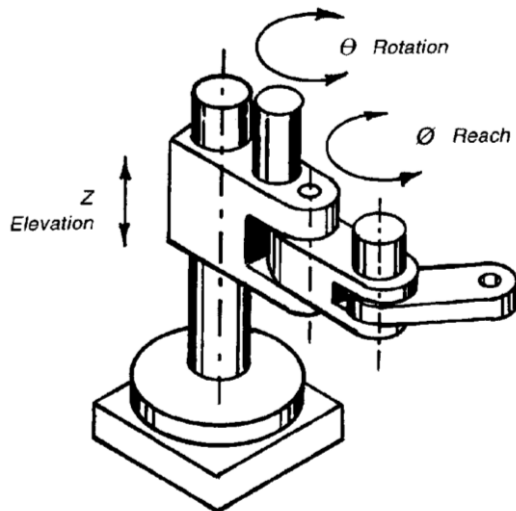
Kuva 2: Yleisimpiä teollisuusrobottien rakenteellisia ratkaisuja. [Kuivanen 1999, s.12]

Ensimmäisenä kuvassa on suorakulmainen robotti, jonka työalue on suorakulmainen särmiö ja työliikkeet tapahtuvat kolmea lineaariakselia pitkin. Suorakulmaisesta robotista käytetään myös nimeä portaalirobotti. [Kuivanen 1999, s.16]

Sylinterirobotin nimi tulee sylinterinmuotoisesta työalueesta. Sylinterirobotissa jalusta on pyörivä ja pysty- sekä vaakaliike ovat lineaarisia. Näiden lisäksi robotissa saattaa olla erillinen liike työkalun kulman muuttamiseen. [Kuivanen 1999, s.17]

Napakoordinaatistorobotti koostuu pyörivän jalustan päälle kootuista yhden akselin suunnassa kiertyvästä varresta ja lineaarivarsista. Robotin työskentelyalue on pallomainen.

SCARA-robotissa (Selective Compliance Assembly Robot Arm) työvälineen asemaa tasossa liikutetaan kolmella kiertyvällä nivelellä ja korkeutta yhdellä lineaariakselilla. [Kuivanen 1999, s.16] Kuvassa 3 esimerkki SCARA-robotista ja sen rakenteesta. SCARA-robotteja käytetään erityisesti pystysuoraa liikettä vaativissa kokoonpanotehtävissä, muun muassa elektroniikan kokoonpanossa, jossa Scaran nopeus ja tarkkuus ovat etuja. SCARA-robotin rajoitteena voidaan pitää sen pientä ulottuvuutta. [Sandin 2003, s.247]



Kuva 3: SCARA-robotin rakenne ja vapausasteet. [Sandin 2003, s.247]

Tavallisimmin teollisuusrobotit ovat rakenteeltaan kiertyvänivelisiä (kuvassa 2 viidentenä). Kiertyvänivelisissä roboteissa kaikki vapausasteet ovat kiertyviä ja vapausasteita on yleensä joko neljä tai kuusi. Mikäli vapausasteita on kuusi ja vähintään kolme niistä on kiertyviä, saadaan robotin käyttämä työkalu mihin tahansa asentoon missä tahansa robotin työalueen pisteessä. [Kuivanen 1999, s. 16-18]

Viimeisenä kuvassa 2 on rinnakkaisrakenteinen robotti, joka edustaa suljettua kinemaattista rakennetta. Rakenne perustuu nivelöityihin, päistään yhteen kytkettyihin varsiin, joiden pituutta muuttamalla saadaan kärkipisteen sijaintia muutettua. Rakenteen etuna, kuten jo aikaisemmin kinemaattisesti suljetuista rakenteista todettiin, on sen tukevuus ja sitä kautta saavutettava rakenteen keveys ja nopeus. [Kuivanen 1999, s.16]

2.1.2 Tuotantosolut

Robottijärjestelmän hankintaa harkitessa tulee etukäteen selvittää muutamia seikkoja. Robotisointia voidaan hyödyntää, mikäli tuotanto on jo valmiiksi toteutettu soluperiaatetta noudattaen. Yleisesti ottaen robotisoinnin tulisi perustua todelliseen käytännön tarpeeseen. [Kuivanen 1999, s. 92]

Robotisoitua tuotantosolua suunnitellessa, ensimmäisenä tulisi selvittää solun ja sen ympäristön välisiin toimintoihin liittyvät asiat. Käytännön tason sijoittelu muihin tuotantopisteisiin nähden on oleellisessa asemassa toimivuuden kannalta. Tähän liittyen myös materiaalivirrat ja kappaleiden tila ovat ainakin karkealla tasolla hahmoteltava. Tuotantosoluun sidottavissa oleva henkilötyövoima on määritettävä, sillä vaikka robotisoinnin ideana on vapauttaa henkilöstöä rutiininomaisista tehtävistä, on ylläpitoon ja valvontaan varattava resursseja. Robotin, kuten muidenkin teollisuudessa käytettävien laitteiden kohdalla, on huomioitava myös sopiva käyttöympäristö ja ympäristön mahdolliset erityisvaatimukset. [Kuivanen 1999, s. 92]

Seuraavassa vaiheessa tarkennetaan alkuvaiheen suunnitelmia. Tähän kuuluu käsittely- ja syöttölaitteiden suunnittelu eli paletit, kuljetukseen liittyvät välineet ja robotin käyttämä työkalu/tarrain. Robottisolun tarkan layoutin määrittäminen tapahtuu myös tässä vaiheessa. Mikäli kyseessä on monesta solusta koostuva tuotantolinja, tulee tuotteen kulku ja sen tekninen toteutus suunnitella tässä vaiheessa. Käytännössä valitaan työstöyksiköt ja kuljetinratojen toteutustapa. Kuvassa 4 on esimerkki kappaleenkäsittely/koneistusyksikön 3d-mallista. Laitteiden yhteensopivuus tulee varmistaa tuotantoyksiköiden ja oheislaitteiden välillä. Robottiikkasolujen toteutuksessa on myös täytettävä erilaisia standardien määrittämiä turvallisuustekijöitä. Turvajärjestelmän ja laitteiden suunnittelu suoritetaan tässä vaiheessa. Kuvassa 4 robotin työalue on aidattu ja työalueelle siirtyminen käynnistää turvajärjestelmän ja robotin toiminta pysähtyy. Vaikka robottien on tarkoitus toimia lähestulkoon tauotta, pitää suunnitteluvaiheessa huomioida miten järjestelmän huolto ja kunnossapito toteutetaan. Robottisolulle tulee järjestää myös vakaa energiansiirtojärjestelmä, käytännössä virta- ja jännitevaihtelut tulisi minimoida robotin toiminnan varmistamiseksi. Myös ympäristön lämmönvaihtelut tulisi estää, sillä robotin paikoitustarkkuuden ollessa millimetrin osia on lämmönvaihtelulla suuri vaikutus robotin toimintatarkkuuden kannalta. [Kuivanen 1999, s.92]



Kuva 4: Esimerkki robottisolun toteutuksesta. [Robotmation 2015, s. 2]

2.1.3 Sovelluskohteet

Teollisuusrobotteja käytetään lukuisissa toisistaan eroavissa sovelluksissa. Eniten teollisuusrobotteja käytetään lukumääräisesti kappaleenkäsittelyyn, hitsaukseen ja kokoonpanoon. Seuraavissa kappaleissa esitellään näistä sovelluksista esimerkkejä teollisuudesta.

Esimerkkinä hitsaussolusta toimii Enko Staudingerissa suunniteltu eri hitsausmenetelmiä yhdistävä, pienikokoinen ja esteettömyyttä painottava hitsaussolu. Solu rakentuu kahdesta nivelsiirrobotista, joissa toisessa on suojakaasuhitsauslaitteisto ja toisessa pistehitsauslaitteisto. Työstettävät kappaleet tuodaan soluun pyörivän, kaksipuolisen pöytäjärjestelmän avulla. Pöydän toinen puoli ja siinä olevat työkappaleet ovat solun sisällä robottien käsiteltävänä. Pöydän toinen puoli on solun ulkopuolella ja siinä olevat valmiit kappaleet poistetaan manuaalisesti ja uudet, hitsaamattomat kappaleet kiinnitetään pöytään toisen puolen ollessa työstettävänä. [Kuka Robotics 2014, s. 1-4]

Kappaleenkäsittelysolusta esimerkkinä käytetään ajoneuvoistuinten alihankintana valmistavan Isringhausen GmbH & Co:n yhdistettyä kappaleenkäsittely- ja hitsaussolua. Solu koostuu robotista, joka poimii tuotantolinjalta värähtämenetelmällä orientoidut osat, asettaa ne kiinteään vastahitsauskoneeseen. Hitsausprosessin jälkeen nivelsiirroboti siirtää tuotteen takaisin kuljetushihnalle. Robottien hitsaamat kappaleet käyvät tämän jälkeen läpi kameralla suoritettavan laaduntarkastuksen. Yhdessä solussa yhdistyy siis kappaleenkäsittely ja hitsaus. [Motoman 2013, s. 1-2]

Robotisoidusta kokoonpanosta esimerkkinä toimii Kiinassa toimiva elektroniikkaa, pääasiassa tietokoneisiin liittyvää laitteistoa, valmistava yritys Rapoo. Kokoonpantavat tuotteet ovat pieniä, mutta melko monimutkaisia. Kokoonpano suoritetaan nivelsiirrobotilla, jonka ulottuvuus on hieman yli puoli metriä. Tuotannon robotisointiin esitettiin monia perusteita. Tehtaan tuottavuus parani robotisoinnin ansiosta ja toisaalta ongelmana ollut pätevien kokoonpanijoiden puute saatiin ratkaistua. Jälkikäteen arvioitiin, että roboti oli n. 60 % tehokkaampi kuin ihmistyöntekijä kokoonpanotyössä. Takaisinmaksuaika roboti-investointille oli kaksi vuotta. [ABB Robotics 2014, s. 1-2]

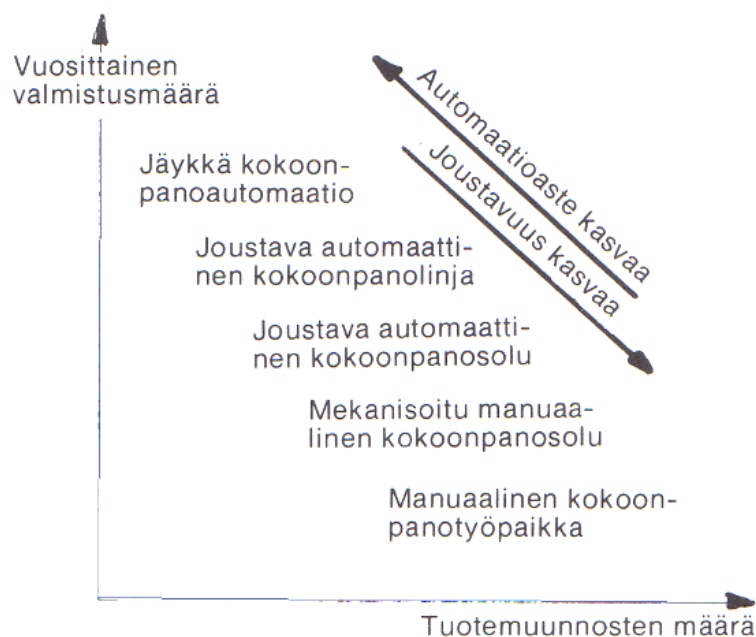
Kaikissa edellä mainituissa sovelluskohteissa tulee esiin aikaisemmassa luvussa mainitut suunnittelun pääpiirteet: tekniset ratkaisut, solun liittyminen muuhun tuotantoympäristöön, materiaali- ja energiat, käytössä olevat resurssit ja taloudelliset näkökulmat kannattavuuden suhteen.

2.1.4 Kokoonpanoautomaatio

Kokoonpanoautomaatio voidaan jakaa kahteen pääryhmään; kiinteään ja joustavaan kokoonpanoautomaatioon. Jäykkä kokoonpanoautomaatio koostuu yksittäistä tuotetta

varten kootusta kokoonpanolaitteesta tai tuotantolinjasta. Ominaista jäykille kokoonpanojärjestelmille on tuotteen säilyvyys samana ja suuret tuotantosarjat. Kaikilla teollisuudenaloilla ei Suomessa ole edellytyksiä käyttää jäykkää kokoonpanojärjestelmää, sillä tuotteen muuttuessa ja sarjojen ollessa melko pieniä ei jäykän kokoonpanojärjestelmän käyttö ole kustannustehokasta. Jäykän kokoonpanojärjestelmän muokkaaminen tuotteen muutoksien takia ei ole taloudellisesti kannattavaa. [Ihalainen & al. 2009, s.480-481]

Joustavan kokoonpanojärjestelmän käytön edellytyksenä voidaan pitää tuoteperhettä, jonka valmistusmäärät ovat vuositasolla vähintään noin kymmenen tuhatta kappaletta. Kokoonpantavien tuotteiden välillä voi esiintyä eri variaatioita ja valmistuserien koot vaihtelevat. Mitä joustavampi järjestelmä on kyseessä, sitä pienempiä eriä voidaan kannattavasti kokoonpanna. Joustavassa kokoonpanojärjestelmässä tuote liikkuu yleensä erilaisten kokoonpanopalettien mukana automatisoitujen työasemien läpi. Tuotteen siirtely vaiheesta toiseen ja eri työvaiheet voidaan suorittaa teollisuusroboteilla, jotka joustavuudellaan ja uudelleenohjelmoitavuudellaan tekevät järjestelmästä muokattavan eri tuotevariaatioita varten. Kuvassa 5 on selvitetty automaatioasteen valinta vallitsevan tilanteen mukaan. [Ihalainen & al. 2009, s. 481]



Kuva 5: Automaatioasteen ja joustavuuden suhde tuotteen variaatioihin ja valmistusmäärään nähden. [Ihalainen & al. 2009, s. 483]

Tuotannon robotisointiin liittyy myös kokoonpantavan tuotteen rakenne. Mikäli tuote on aikaisemmin kokoonpantu käsin, ei välttämättä ole aina mahdollista tuotteen rakenteesta johtuen robotisoida kokoonpanoa. Mikäli mahdollista, käsiteltävä tuote tulisi suunnitella kokoonpanon automatisointia silmällä pitäen. Robotisoidusta kokoonpanosta saatu kokemuseräinen tieto on osoittanut, että tärkeimmät piirteet robotilla koottavalle tuotteelle ovat modulaarisuus (pienet alikokoonpanot), osien pieni lukumäärä ja kokoonpanosuuntien minimointi. [Ihalainen & al. 2009, s.484]

Tuotteen ja sen osien rakennetta suunnitellessa on syytä huomioida valmistettavuus ja kokoonpantavuus, DFM ja DFA (Design for Manufacturing ja Design for Assembly). Pelkästään pienen yksittäisen osan käsittelyssä ja syötössä automaattiselle järjestelmälle voidaan kohdata monenlaisia ongelmia. Osien syöttäminen voidaan toteuttaa monella eri tavalla, hieman osan koosta ja ominaisuuksista riippuen, esimerkiksi tärysytötimillä, nauhoilla tai paleteilla. Esimerkkeinä yksittäisen osan käsittelyssä kohdattavissa ongelmista ovat muun muassa osien toisiinsa takertuminen geometrian vuoksi (hakautuminen) ja osan saaminen haluttuun orientaatioon. Näihin voidaan vaikuttaa osaan lisättävillä tai siitä poistettavilla geometrisilla piirteillä, osan painopisteellä ja symmetrialla tai sen puuttumisella. Osan saaminen oikeaan orientaatioon koskee lähinnä pienosia, jotka syötetään ns. ämpäritavarana tärysyttimeen. Paletit ja nauhat huolehtivat yleensä osien orientaatiosta paremmin. [Lempiäinen 2003, s. 121-137]

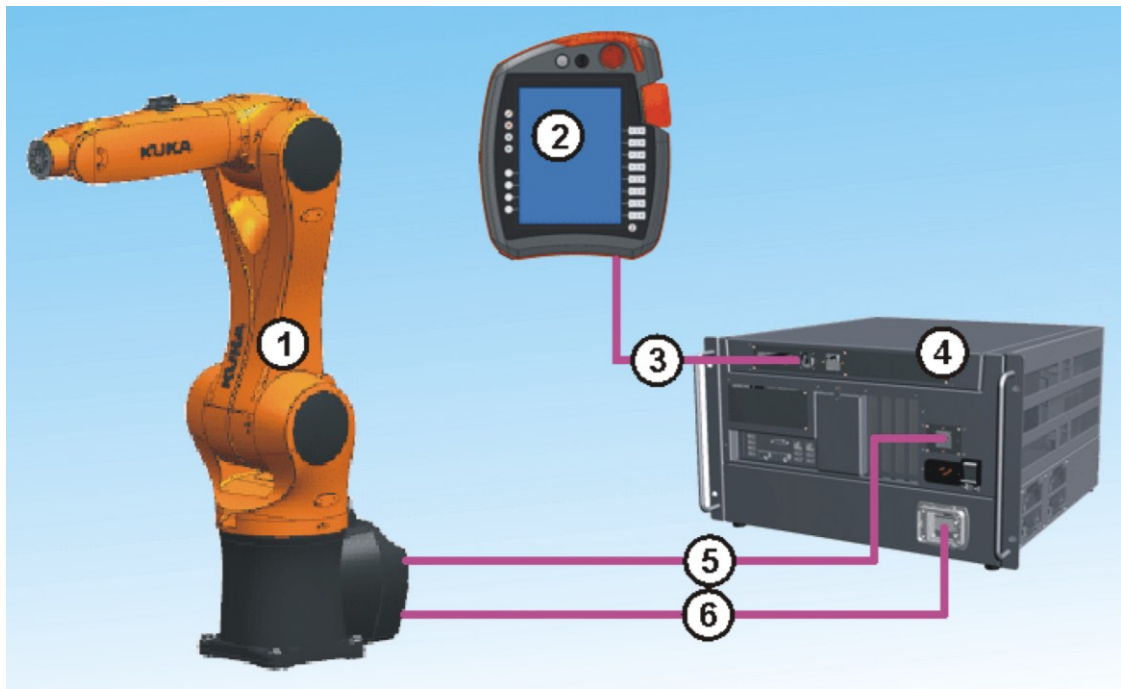
2.2 Nivelvarsirobotit

Nivelvarsirobotit koostuvat erityyppisillä nivelillä yhdistetyistä peräkkäisistä varsirakenteista. Robotin runkoa, eli osuutta jolla suoritetaan varsinainen liike, kutsutaan manipulaattoriksi. Manipulaattorin päässä on robotin ”ranne”, jonka pyörivä liike mahdollistaa työkalun lopullisen asemoinnin ja työkalu itsessään suorittaa halutut toiminnot. [Siciliano & al. 2009, s. 4]

Nivelvarsiroboteissa käytetään kahdentyyppisiä niveliä. Nivelet ovat joko yhden akselin suhteen rotaation sallivia tai yhden akselin suunnassa lineaarisen liikkeen sallivia. Nivelten tyyppi ja kokonaismäärä määrittävät robotin kokonaisvapausasteiden määrän. Molemmat edellä mainitut nivelet ovat tyypiltään yhden vapausasteen niveliä. Mikäli robotin työskentelyalue on kolmiulotteinen tila, vapausasteita tulisi olla vähintään kuusi, jotta kaikki tilan pisteet ja työkalun asennot voidaan saavuttaa. [Siciliano & al. 2009, s. 4]

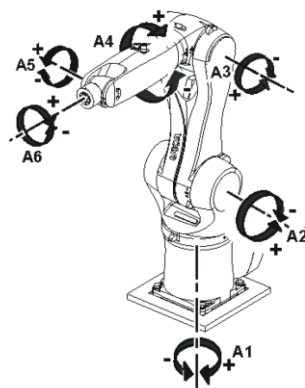
2.2.1 Kuka KR 6 R900 sixx

Tässä työssä suunniteltavaa tarrainta tullaan testaamaan KUKA KR 6 R900 sixx nivelvarsirobotissa, jonka ominaisuuksiin, suorituskyykyyn ja tekniikkaan liittyviä tietoja esitellään tässä luvussa. Kokonaisuutena järjestelmä koostuu kuvassa 6 olevista osista; robotista (1), käsiohjaimesta (2), ohjainkaapelista (3), ohjausyksiköstä (4), datakaapelista (5) ja moottorikaapelista (6). Näiden lisäksi lopulliseen robottiyksikköön kuuluu yleensä turva-aitaukset, työskentelytasot ja niihin liittyvät paletit ja liitännät sähkö- sekä pneumatiikkaverkkoon.



Kuva 6: KUKA KR 6 R900 sixx robottiyksikkö ohjauslaitteineineen. [Kuka Robotics 2013, s. 11]

Kuka KR 6 R900 sixx robotti on kuusinivellinen. Kuvassa 7 näkyy robotin nivelten sijainnit ja pyörimissuunnat. Kaikki nivelet ovat rotaationiveliä, eli yhden akselin ympäri kiertäviä. Oleellista robotin suorituskyvyn ja liikkeiden kannalta on nivelten kiertymäkulma ja kiertonopeus. Liikenopeuteen vaikuttaa robotin päässä oleva kuorma, eli robotin käyttämän työkalun ja mahdollisesti siirrettävän työkappaleen massa. Taulukossa 1 on listattu yksittäisten nivelten maksimiliikerata ja nopeus robotille mitoitettulla oletuskuormalla.

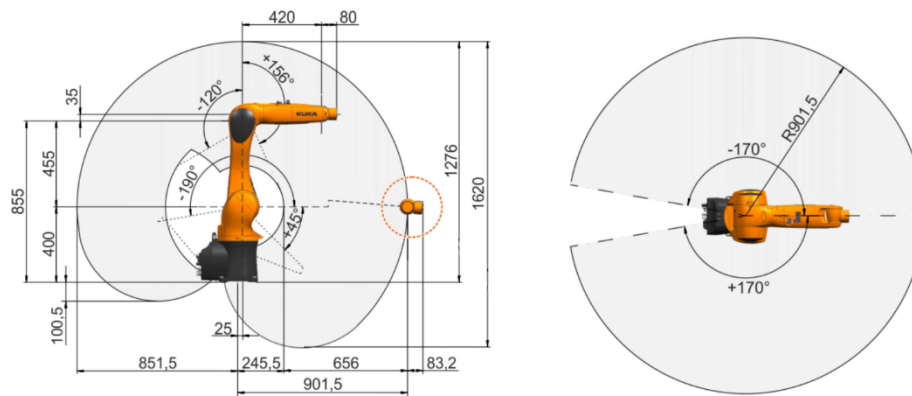


Kuva 7: Kuka KR 6 R900 sixx robotin nivelten sijainnit ja oletuspyörimissuunnat. [Kuka Robotics 2013, s. 19]

Taulukko 1: Kuka KR 6 R900 sixx robotin nivelten liikeradat ja liikenopeudet. [Kuka Robotics 2013, s.18]

Nivel	Maksimiliikerata (°)	Nopeus oletuskuormalla (°/s)
1	+/- 170	360
2	+45 - -190	300
3	+156 - -120	360
4	+/-185	381
5	+/-120	388
6	+/-350	615

Nivelten liikeradat määrittävät robotin työalueen (kuvassa 8). Työalueen laajuus ja sen rajoitteet tulee huomioida robottisolua, yksittäisiä työvaiheita ja työkalujen sekä palettien sijoittelua suunnitellessa.



Kuva 8: Kuka KR 6 R900 sixx robotin työalue ja ulottuvuus. [Kuka Robotics 2013, s. 23]

Robotissa käytettävää tarrainta suunnitellessa on oleellista kiinnittää huomiota robotin liikkeissä tapahtuviin kiihtyvyyksiin. Kiihtyvyydet tulee erityisesti huomioida tarraimen ja liikuteltavan työkalupaleen välistä voimaa arvioidessa. Työssä käytettävälle robotille ei ole annettu suoraan mitään kiihtyvyyssarvoja, mutta suuntaa-antavia lukuja voidaan laskea robotille tehdyistä pysäytystesteistä (taulukko 2) ja myös erilaisia yleisiä ohjeellisia arvoja on saatavissa. Laskentaa tarkastellaan työn käytännön puolta käsittelevissä luvuissa. Taulukossa esitetyt pysäytysarvot on saatu oletuskuormalla ja robotin rungon ollessa maksimietäisyydelle ojentautuneena.

Taulukko 2: Robotin pysäytystestin arvot kolmelle ensimmäiselle nivelelle oletuskuormalla (3 kg) ja robotin ollessa maksimietäisyydelle ojentautuneena. [Kuka Robotics 2013, s. 65]

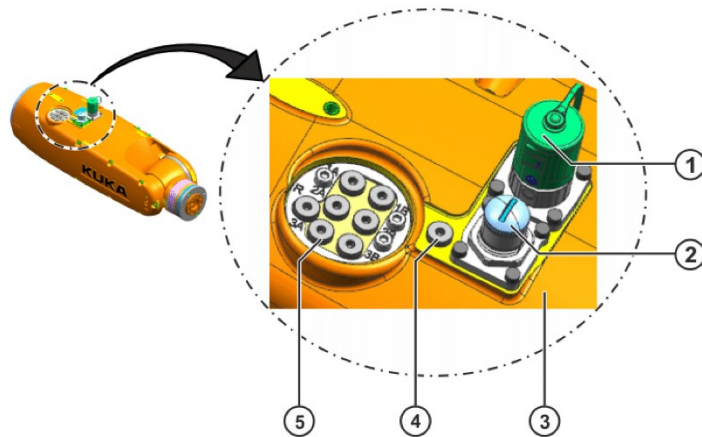
Nivel	Pysäytysmatka (°)	Pysäytysaika (s)
1	113,59	0,507
2	126,76	0,684
3	68,10	0,370

Oleellista tämän työn kannalta on myös robotin tarkkuus. Tämä kyseinen robotti voidaan kokonsa, ulottuvuutensa ja kuormankantokyvyn suhteen luokitella pienen kokoluokan robotiksi. Kuka KR 6 R900 sixx robotin perusominaisuudet:

- maksimikuorma 6 kg (oletuskuorma 3 kg)
- maksimiulottuvuus 901 mm
- nivelten määrä 6 kpl
- toistotarkkuus $\pm 0,03$ mm
- robotin massa 52 kg
- asennusmahdollisuudet: lattia-, seinä-, kattotaso
- suojaluokka IP54. [Kuka Robotics 2016]

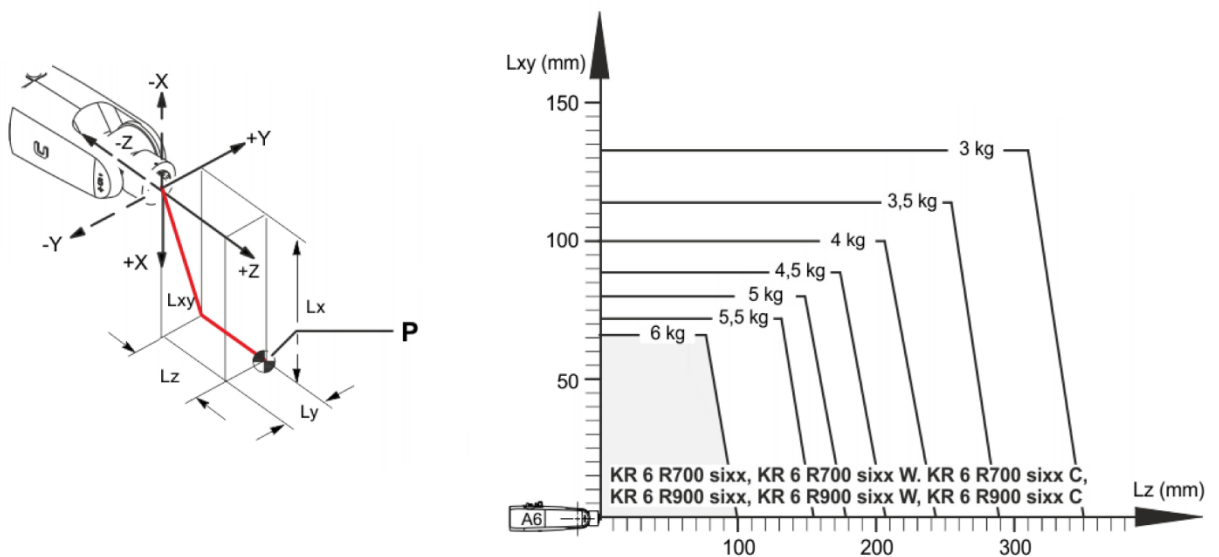
Edellä luetellut asiat tulee huomioida robottisolua suunnitellessa ja tarrainsuunnittelun kannalta tulee huomioida robotin maksimikuorma, ulottuvuus ja toistotarkkuus.

Tarraimen toimintoja suunnitellessa tulee huomioida myös käytettävissä oleva rajapinta ja liitännät. Työssä käytettävän robotin käsivarressa on sähköinen ja pneumaattinen rajapinta (kuvassa 9). Sähköisessä rajapinnassa on kuusi kappaletta digitaalisia sisääntuloja, kaksi kappaletta digitaalisia ulostuloja ja 24 voltin tasavirtaliitin sekä maaliitin. Pneumatiikkarajapinta koostuu kolmesta 5/2-suuntaventtiilistä.



Kuva 9: Robotin käsivarressa sijaitseva pneumaattinen ja sähköinen rajapinta. [Kuka Robotics 2013, s. 108]

Robotin kuormankantokyvyn huomioon ottaminen ei riitä pelkästään maksimikuorman tarkastelu, vaan tulee huomioida myös massakeskipisteen sijainnin vaikutus. Kuvan 10 käyrästä voidaan tarkistaa sallitut rajat massakeskipisteen sijainnin suhteen. Mikäli maksimikuorma huomioon otettuna massakeskipisteen sijainnilla ylittyy, aiheutuu robotin moottoreihin ja voimansiirtoon ylimääräistä kuormitusta ja robotin käyttöikä lyhenee.



Kuva 10: Robotin työkalun massan ja massakeskipisteen sijainnin rajoitukset. [Kuka 2013, s. 27]

2.3 Tarraimet

Tässä luvussa käydään läpi roboteissa käytettäviä tarraimia, niiden suunnitteluprosessia ja prosessissa huomioitavia asioita. Näiden lisäksi käsitellään erilaisia tarraintyypppejä, niiden teknisiä ratkaisuja ja ominaisuuksia.

2.3.1 Yleisesti tarraimista, niiden suunnittelusta ja hankinnasta

Tarrain on yleisin teollisuusroboteihin liitettävä työkalu ja kuten myös aikaisemmin todettiin, tarrain suunnitellaan usein käyttökohteen mukaan. Vaihtoehtoisesti robotin käyttämä työkalu voi olla jokin prosessityökalu, kuten hitsauspistooli tai maalausruisku. Myös prosessityökalun ja tarraimen yhdistelmiä esiintyy, kuten tässäkin työssä on tarkoitus yhdistää tarrain ja testausprosessi. Tarraimen suunnittelu on yksi tärkeimpiä osa-alueita robottisovelluksissa. Tulevissa kappaleissa on listattu tarrainsuunnitteluun liittyviä yleisiä periaatteita. [Kuivanen 1999, s. 60]

Teollisuusrobottien ollessa rakenteeltaan peräkkäin kytkettyjä nivelvarsia, niiden kuormankantokyky on rajattu. Tästä syystä tarraimen suunnittelussa tulisi kiinnittää huomiota tarraimen massaun, sillä tarraimen paino vähentää nostettavan hyötykuorman painoa. Paino vaikuttaa tarraimen rakenteeseen, materiaaliin ja osien sijoitteluun (esimerkiksi mahdollisia hallintalaitteita ei välttämättä kannata sijoittaa tarraimen sisään, vaan vetää johdotukset erilliselle ohjausyksikölle). [Kuivanen 1999, s. 65]

Tarraimen tulisi olla myös rakenteeltaan yksinkertainen. Tähän on monia syitä, kuten yksinkertaisen rakenteen toimintavarmuus ja kustannukset. Tarraimen tulisi kestää hyvin monia toistoja ja olla mahdollisimman huoltovapaa, jotta vältetään tuotantokatkoksilta. Yksinkertaisen rakenteen huoltaminen on myös yleensä helpompaa ja pieni osamäärä tuo yleensä myös säästöjä kustannuksissa. [Kuivanen 1999, s. 65]

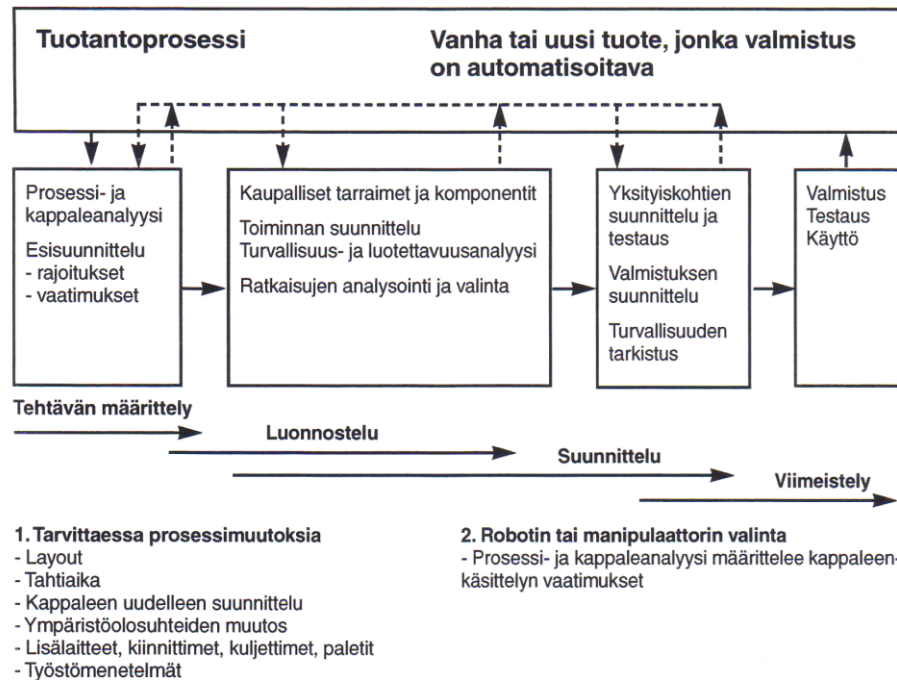
Tarraimen geometriassa tulisi kiinnittää huomiota tarraimen kokoon ja tätä kautta myös ulottuvuuteen. Pienikokoinen tarrain, josta on karsittu kaikki ylimääräinen, on usein myös massaltaan pieni. Suurikokoinen tarrain on usein myös kömpelö käyttää ja tarraimen ulottuvuus ja luoksepääsevyys kärsii esimerkiksi ahtaissa paikoissa. [Kuivanen 1999, s. 66]

Tarraimen tarkkuus on monessakin suhteessa oleellinen asia. Robotin kaikkea potentiaalia ei päästä hyödyntämään, mikäli tarrain toimii epätarkasti. Tähän liittyen myös tartunnan luotettavuus on tärkeä asia. Tarraimen tulisi jokaisella tartuntakerralla saada samanlainen ote tuotteesta, vaikkakin vaadittu tarkkuus riippuu sovelluskohteesta. Tartunnan tulisi myös säilyä tuotetta liikutettaessa, sillä pudonnut tuote voi aiheuttaa häiriöitä tuotannossa ja vaatii usein tuotteen poistoa käsin, joka taas johtaa tuotannon hetkelliseen pysäyttämiseen. [Kuivanen 1999, s. 66]

Ylipäätään tarrainsuunnittelussa tulisi tuntee koko tuotantoprosessi ja tehdä tämän suhteen tarkat etukäteisanalyysit, jossa huomioidaan prosessin, tuotteen ja ympäristön vaatimukset sekä luodaan kuva robotin ja tarraimen yhteisestä suorituskyvystä. Lisäksi tarrainta valitessa tai suunnitellessa tulisi pohtia tarraimelta vaadittua älykkyyttä sekä sen mukautuvuutta esimerkiksi erilaisille tuotteille. [Kuivanen 1999, s. 65]

Tarraimen suunnitteluprosessi voidaan jakaa eri vaiheisiin; analyysiin, esisuunnitteluun ja varsinaiseen suunnitteluun, joka voidaan jakaa vielä kehittely- ja viimeistelyvaiheeseen. On syytä muistaa, että suunnittelu on lähestulkoon aina iteratiivista, kuten myös tässä tarrainsuunnittelumallissa (kuva 11). [Kuivanen 1999, s. 65]

Älykkään teollisuustarraimen suunnittelukonsepti.
Tarrain on vain osa automaattista tuotantoprosessia tai robottijärjestelmää.



Kuva 11: Tarrainsuunnittelun eri vaiheet. [Kuivanen 1999, s. 65]

Analyysivaiheessa tarkastellaan robotin suorittamaa prosessia, käsiteltävää kappaletta ja toimintaympäristöä. Käsiteltävä kappale määrittää tartuntamekanismilta vaadittavat ominaisuudet (tartuntapisteet, voimavälitys, liikealueet ja anturoinnit). Robotti ja käyttöympäristö määrittävät omat reunaehdonsa, kuten liitettävyyden, paletit ja yleiset resurssit. Näiden vaatimusten ja rajoitusten pohjalta luodaan esisuunnittelua varten tehtävän määrittely. Esisuunnittelun eri osa-alueet ja niihin liittyvät piirteet käydään läpi seuraavissa kappaleissa. [Kuivanen 1999, s. 66-67]

Tartuntaprosessi voidaan suorittaa joko muoto- tai kitkasulkeisesti, näiden yhdistelmänä tai mahdollisin erityismenetelmin. Yleisesti ottaen pieniä ja hauraita kappaleita käsiteltäessä on suositeltavaa käyttää muotosulkeista tartuntatapaa, jotta vältetään kappaletta kuormittavilta voimilta ja tätä kautta vaurioilta. [Kuivanen 1999, s. 67-68]

Esisuunnitteluvaiheen mekaniikkasuunnittelussa käydään läpi käyttöenergia, joka on yleensä joko pneumaattista tai sähköenergiaa, joissain tapauksissa myös hydraulikkaa on käytetty robottisovelluksissa. Tämän lisäksi mekaniikkasuunnitteluun kuuluu toimilaitemekanismin suunnittelu ja mekanismin ohjauksen suunnittelu. Tarraimessa käytettävien tartuntapintojen, -sormien ja -kynsien muotoilu suoritetaan tässä vaiheessa. Näiden lisäksi mahdollisten antureiden ja konenäön käyttö prosessissa suunnitellaan alustavasti. Tarttujan mekaniikkaa suunniteltaessa on hyvä pitää tavoitteena yksinkertaisuutta, sillä sen avulla tuotteesta saadaan luotua toimintavarma ja huoltovapaa. Mikäli tarttuja on toteutettu nivelmekanismilla, tulee suunnitteluvaiheessa huomioida nivelkitkojen ja kulmien vaikutus. [Kuivanen 1999, s. 68]

Tartuntavoiman suhteen tulisi huomioida käsiteltävän kappaleen massan aiheuttamien voimien lisäksi myös robotin liikevoimat. Mitoitus suoritetaan voimien suhteen ns. huonoimman tilanteen suhteen eli oletetaan kappaleeseen kohdistuvan mahdollisimman suuri eri voimien kombinaatio ja valitaan varmuuskerroin väliltä 1,5-2. Myös erilaiset hätäpysäytys- ja törmäystilanteet tulee huomioida tartuntavoimia arvioiessa. Törmäystilanteisiin liittyen tarraimen mekaaniseen rakenteeseen on useimmiten syytä sisällyttää jonkinlainen ylikuormitussuoja, esimerkiksi hallitusti rikkoutuva osa tai kuormitusta mittaava anturi. [Kuivanen 1999, s. 68-69]

Esisuunnitteluvaiheessa valitaan alustavasti käytettävä anturointi. Anturoinnin perustehtävänä on luoda tarttujalle ja robotille kyky sopeutua muutoksiin ja tarkkailla laitteiston tilaa. Vähimmäisvaatimuksena anturoinnin suhteen pidetään yleensä kykyä ilmoittaa päätoiminnon epäonnistumisesta ylemmälle ohjaustasolle, eli esimerkiksi mikäli kappaleen käsittelijä ei saa kappaleesta kiinni, kulkee siitä ilmoitus robotin tai järjestelmän ohjaukselle ja tämä johtaa jatkotoimiin. Anturoinnin suhteen voidaan tehdä karkea jako sisäistä ja ulkoista tilaa eli ympäristöä mittaaviin antureihin. Anturointi valitaan tarraimen käytön, ympäristön ja ohjausjärjestelmän perusteella. Antureiden mekaanisen sijoittelun suhteen on huomioitava käsiteltävä kappale ja ympäristöolosuhteet. [Kuivanen 1999, s. 69-70]

Esisuunnittelusta siirrytään varsinaiseen suunnitteluvaiheeseen, joka voidaan jakaa kehittely- ja viimeistelyvaiheeseen. Suunnittelussa jalostetaan esisuunnitelmaa ja valitaan lopullinen kokoonpano. Seuraavissa kappaleissa käydään läpi kehittely- ja viimeistelyvaiheen peruseriaatteen ja tehtävät.

Kehittelyvaiheessa lähtökohtana on suunnitella tuotteen toiminta, sekä huomioida samalla turvallisuus ja luotettavuus näkökulmat. Turvallisuuden suhteen tulee kuitenkin pitäytyä kustannustehokkaissa ratkaisuissa. Tuotteen turvallisuuden suhteen lähtökohtana voidaan pitää voimassaolevia määräyksiä ja standardeja. Turvallisuuden kannalta on hyvä noudattaa kahta peruseriaatetta tarraimen toimintaa suunnitellessa. Kappaleen tulee pysyä tarraimessa, vaikka tarraimen tehonlähde lakkaisi toimimasta. Tämä voidaan toteuttaa esimerkiksi paineakulla, itsepidätyvällä mekanismilla tai jousikuormituksella. Tarraimen tulee myös säilyttää senhetkinen tilansa hätäpysäytyksessä. Mikäli käytetään törmäyksentunnistukseen antureita, tulisi näiden oletuksena olla suljettuja piirejä, jolloin kaapelivian sattuessa virtapiiri katkeaa ja turvatoiminto kytkeytyy päälle. [Kuivanen 1999, s. 71]

Tarraimen luotettavan toiminnan kannalta on hyvä kiinnittää huomiota seuraaviin tekijöihin ja osa-alueisiin:

- tarraimen yleinen rakenne; komponenttien määrä ja toimintavarmuus, kokonaisrakenteen yksinkertaisuus
- sisäiset häiriöt (tiedonsiirto ja mekaniikan ongelmat)
- ulkoiset häiriöt; vialliset tuotteet, oheislaitteet tai poikkeava ympäristö
- vaatimusmäärittelyn kattavuus tutkimus- ja suunnitteluvaiheissa.

Viimeistelyvaiheessa valitaan lopulliset komponentit, mitoitetaan rakenne ja mikäli tarvetta ilmenee, palataan takaisin kehittämissuorituksen. Viimeistelyvaiheessa on hyvä myös käydä läpi vaatimuslista kohta kohdalta varmistaen, että lopullinen konstruktio vastaa alussa asetettuja vaatimuksia. [Kuivanen 1999, s. 71]

Viimeistelyvaiheessa tehtävän lopullisen tarraimen rakenteen suunnittelussa on syytä noudattaa seuraavia linjauksia ja keskittää huomiota tiettyihin painopisteisiin. Rakenteen tulisi olla kevyt ja tämä voidaan huomioida sekä materiaalivalinnoissa, että rakenteessa. Yleisesti tarrainmateriaaleina suositetaan muovia ja alumiinia ja geometrian suhteen voidaan rakennetta keventää erilaisin leikkauksin. Tarrain suunnitellaan yleensä yhtä tuotetta varten, mutta tuoteperheen sisällä saattaa tapahtua muutoksia ja tällöin monipuolisella tartuntakyvyllä saavutetaan etuja. Tarraimen yleinen ulottuvuuskyky on usein riippuvainen tarraimen ulkomitoista ja toisaalta tarraimen pieni koko tarkoittaa myös pientä massaa, jolloin siirrettävää hyötykuormaa saadaan kasvatettua. [Kuivanen 1999, s. 71]

Tarraimen tarkkuuden suhteen on myös olennaista, että tarttuvan rakenne on jäykkä ja välyksetön. Robotin tarkkuudesta ei päästä hyötymään, mikäli tarraimen rakenne niin sanotusti elää. Tarraimen geometrian tulisi olla myös sellainen, että puristusvoima siirtyy mahdollisimman hyvin käsiteltävään kappaleeseen, eli puristusvoima ohjataan suorinta mahdollista reittiä kappaleeseen. On odotettavissa myös, että tarraimen tulisi kestää useita satoja tai tuhansia työsyklejä päivässä, jolloin myös kulutuksenkesto tulisi huomioida rakenteellisissa ratkaisuissa. Tarraimen sisältäessä erilaisia antureita, tulisi myös näiden suojauksesta huolehtia. Erityisesti antureiden johdotuksia suunniteltaessa tulisi huomioida robotin varren nivelkohdat ja niiden kiertyminen. [Kuivanen 1999, s. 71]

Viimeistelyvaiheessa tulisi huomioida myös asioita, jotka eivät suoraan liity tarraimen toimintaan ja työprosessiin. Tarraimen suunnittelussa tulisi huomioida kokoonpantavuus, huollettavuus ja yleinen valmistettavuus. Kaikki edellä mainitut seikat vaikuttavat tarraimen lopullisiin kustannuksiin ja erityisesti huollettavuus seuraa kustannuksissa koko tarraimen elinkaaren ajan. Tarrainta tulisi myös testata ennen lopullista asennusta. Käytännössä testaus lähtee yksittäisten komponenttien testauksesta ja etenee tästä osatoimintoihin ja lopulliseen konstruktioon. Viimeiset testit suoritetaan tarraimen ollessa lopullisessa käyttökohteessa asennettuna. [Kuivanen 1999, s. 72]

Edellä on käyty läpi yhdenlainen tarraimen suunnitteluprosessi. Seuraavissa kappaleissa käydään läpi anturoidun tarraimen erityispiirteitä, mitä hyötyjä voidaan anturoinnilla saavuttaa ja mitä haasteita se asettaa suunnittelulle. Anturoinnin perusideana on, että tarrain tai tarrainta käyttävä robotti voi mukautua paremmin ympäristöön ja erilaisiin tilanteisiin. Yksinkertaisimmillaan anturointi kertoo toiminnan virheestä ja suojaa tarrainta ja robottia. Tällaisessa tapauksessa tarkoituksena on estää ja lyhentää tuotantokatkoksia. [Kuivanen 1999, s. 72]

Suunnittelun kannalta on parempi, mitä aikaisemmassa vaiheessa haluttu anturointi on tiedossa, jolloin voidaan paremmin ottaa huomioon antureiden sijoittelu, kaapelointi, tehonsyöttö ja suojaus. Yleisesti ottaen suunnittelun kannalta monimutkainen anturointi asettaa haasteita, mutta toisaalta lisää järjestelmän mukautuvuutta. [Kuivanen 1999, s. 72]

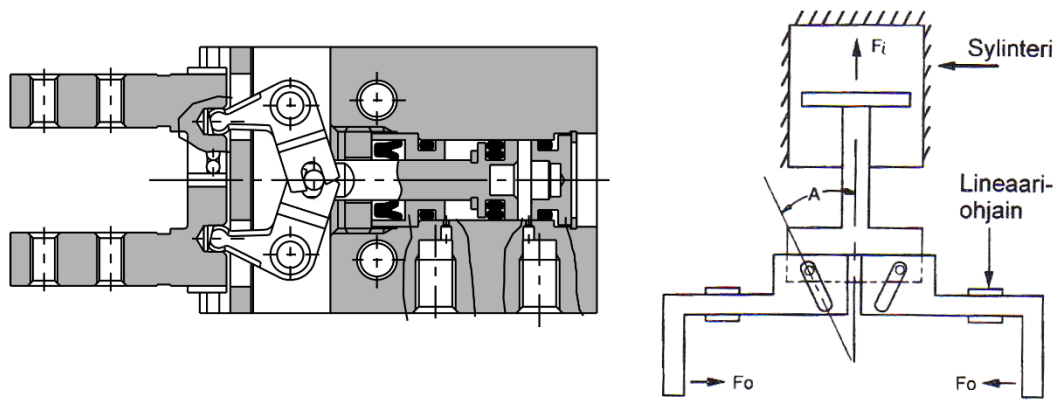
Antureiden ja järjestelmän anturoinnin taso voi vaihdella suuresti. Yksinkertaisimmillaan käytetään on/off-tyyppisiä antureita tartunnan onnistumisen tarkistamiseksi jolloin anturi ilmoittaa, että jotain on kiinni. Useampaa on/off-anturia käytettäessä voidaan tarkistaa, että kappale on oikeassa asemassa tarraimessa. Antureina voidaan käyttää myös mittadataa lähettäviä komponentteja. Tämä asettaa haasteita signaalinkäsittelyn ja suuren datamäärän suhteen. Esimerkiksi voiman tai momentin mittausta voidaan hyödyntää erilaisissa kokoonpanosovelluksissa. [Kuivanen 1999, s. 73]

Anturointi ei aina sijaitse tarraimessa, vaan esimerkiksi käytettävien palettien tilaa tai muuta ympäristöä voidaan havainnoida. Yksi oleellisimmista on turvajärjestelyihin liittyvä ympäristön havainnointi. Esimerkiksi ihmisen tullessa robotin työskentelyalueen sisään, robotin hätäpysäytysjärjestelmä aktivoituu. Käytännössä tämä toteutetaan kytkemällä anturi turva-aitauksen oveen tai kulkuaukkoon. [Kuivanen 1999, s. 72-73]

2.3.2 Tarrainvaihtoehdot

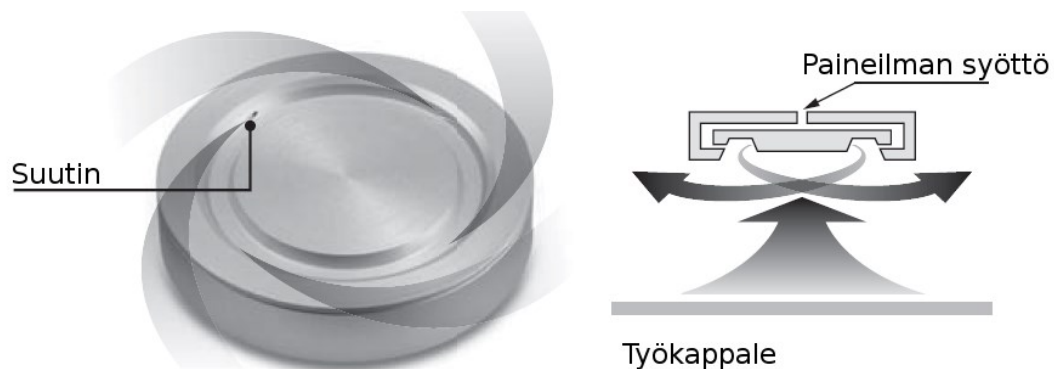
Tarttuja voidaan toteuttaa monilla eri tavoin. Yleisimpiä toteutustapoja ovat mekaaniset ja alipainetarttumat. Muita tarttujissa käytettyjä ratkaisuja ovat magneetit ja laajenemiseen perustuvat rakenteet. Näiden lisäksi on olemassa luokittelemattomia tarraintyyppisiä. Toisaalta edellä mainittuja tekniikoita voidaan yhdistää erilaisiksi revolveri- tai monipäätarraimiksi. [Kuivanen 1999, s. 60]

Mekaaniset tarraimet ovat usein käyttövoimaltaan sähköisiä tai pneumaattisia ja koostuvat kahdesta tai useammasta tarttumasormesta. Tarttumasormien liike voi olla lineaarinen tai saksimainen. Kinemaattisesti tarrain voidaan toteuttaa nivelmekanismeilla, hammastangolla, epäkeskoliikkeellä tai ruuvilla. Kaupallisissa tarraimissa liike on useimmiten toteutettu kuvan 12 kartioliukujohdemekanismeilla. [Kuivanen 1999, s. 60] Kuvassa 12 on esitetty myös erään kaupallisen pneumaattisen lineaaritarraimen rakenne, joka on toimintaperiaatteeltaan muistuttaa kartioliukujohdetta. Liukujohteet on tässä tapauksessa korvattu nivelpisteiden ympäri kiertyvillä varsilla.



Kuva 12: Vasemmalla SMC:n pneumaattisen tarttujan rakenne ja oikealla kartioliukujohdemekanismin periaatekuva. [SMC 2015, s. 6][Kuivanen 1999, s.62]

Mekaanisten tarrainten lisäksi toinen yleisesti käytetty tartuntatapa on alipaine. Käytännössä alipaine toteutetaan perinteisillä imukupeilla tai se voidaan toteuttaa myös kosketuksettomasti, jolloin paineilmalla luodaan sykloni- tai bernoulli-ilmiöön perustuvalla tekniikalla haluttu nostovoima ilman kontaktia työkappaleeseen (kuva 13). Imukuppien vaatima alipaine toteutetaan joko erillisellä alipainepumpulla tai käyttäen paineilmaa ja alipaineen tästä muodostavaa laitteistoa, ejektoria. Sykloni- ja bernoulli-ilmiöön perustuvat kosketuksettomat tarraimet toimivat suoraan paineilmalla. [Festo 2016, s. 2] [SMC 2015, s. 2]



Kuva 13: Kosketukseton alipainetarrain. [SMC 2015, s. 1]

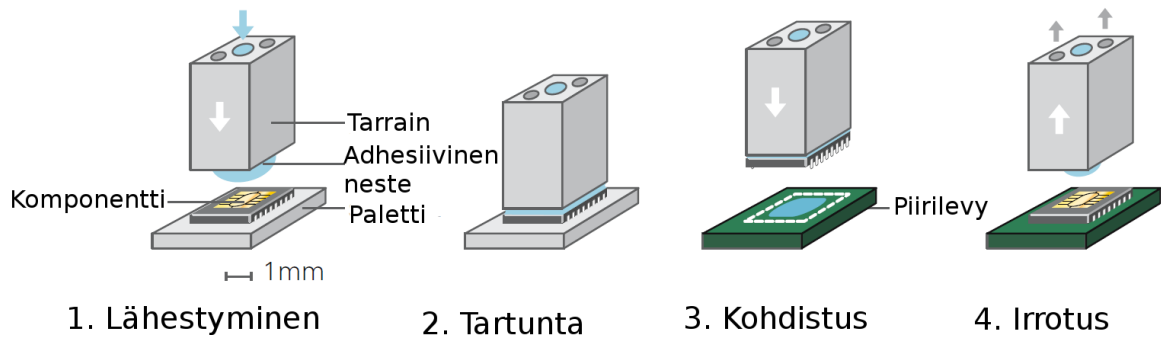
Imukuppitarttujen hyvä puoli on se, että kontaktipinnat ovat usein kumia tai muovia eivätkä vahingoita käsiteltävää kappaletta. Toisaalta imukupit aiheuttavat rajoitteita pinnan suoruuden, sileyden ja tasaisuuden suhteen. Sivuttaisvoimia alipainetarraimet sietävät huonosti, sillä ainoa sivuttaisliikettä vastustava voima on imukupin ja työkappaleen välinen kitkavoima. Sivuttaisvoimien vaikutus estetään usein lisäämällä tarraimen geometriaan muotoja, jotka estävät työkappaletta liikkumasta imuvoimaan nähden sivuttaisessa suunnassa. Nostovoimaa voidaan lisätä imukuppien määrää lisäämällä. Aikaisemmin tämä oli ongelmallista, sillä yhden imukupin menettäessä kontaktin koko järjestelmästä menetettiin alipaine. Nykyisissä järjestelmissä tämä on estetty venttiilijärjestelmin. Erona mekaanisiin tarraimiin, alipainetarraimilla voidaan

käsitellä myös joustavia ja kalvomaisia ohuita kappaleita ja toisaalta alipainetarrain on rakenteeltaan usein yksinkertaisempi ja täten myös halvempi. Laitteiston virhetilanteessa, esimerkiksi paineiden kadotessa, alipainetarraimen nostovoima katoaa kokonaan tai lähes kokonaan. Mekaanisissa tarraimissa tällaiset tilanteet voidaan estää jousikuormituksella. [Kuivanen 1999, s. 63-64] [SMC 2015, s. 1-8]

Magneettiin perustuvien tarraimien käyttö rajautuu vain magneettisiin materiaaleihin. Tartunta voidaan toteuttaa kesto- tai sähkömagneetilla. Kestomagneettia käytettäessä käsiteltävä kappale täytyy irrottaa magneetista mekaanisesti kasvattamalla kappaleen ja magneetin välistä etäisyyttä, jolloin magneettikentän voimavaikutus vähenee. Sähkömagneettia käytettäessä riittää virran katkaiseminen magneetista, vaikka työkappaleen irrotus saattaa silti tapahtua melko hitaasti jäännösmagnetismin vuoksi. Magneettitarraimia käytettäessä tulee soveltuvan materiaalin lisäksi huomioida kappaleen muoto, pinnanlaatu sekä tarraimen ja työkappaleen välinen ilmarako. Sähkömagneettia käytettäessä ongelmia aiheuttaa myös magneetin lämpeneminen käytössä. Tämä tulee huomioida työsyklissä antaen magneetille riittävästä jäähtymisaikaa tartuntojen välillä. [Kuivanen 1999, s.64]

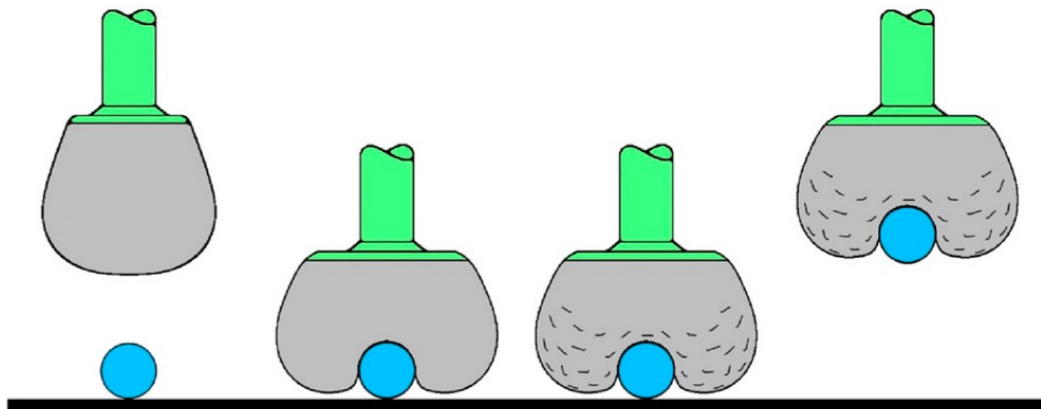
Laajenevia tarraimia voidaan käyttää silloin, kun kappaleeseen on mahdollista saada sisäpuolinen tartunta. Sisäpuolinen tartunta voidaan tietysti toteuttaa myös perinteisellä mekaanisella tarraimella, mutta tässä tapauksessa käsitellään puhtaasti sisäiseen laajenemiseen perustuvia mekanismeja. Yleensä sisäisesti laajenevat tarraimet koostuvat elastisesta materiaalista muodostetusta ilmanpaineella laajenevasta rakenteesta, jonkinlaisesta paineilmarakosta. Tämän tyyllisille tarraimille ominaista on tasaisesti jakautuva kuormitus kappaleeseen ja toisaalta myös laajentuva tarrain mukautuu hyvin epäsäännöllisen muotoisiin tartuntapintoihin. Käytännössä tartunnan työsykli koostuu tarraimen ajamisesta kappaleen sisään ja kontaktin ottamisesta laajentamalla se paineilman avulla. Irrotus tapahtuu poistamalla tarraimesta paineet, jolloin tarrain pienenee ja kontakti katoaa. [Ardayfio 1987, s. 50]

Adhesiivisten tarraimien toiminta perustuu molekyyli-tason adhesiivisiin voimiin, joka tapahtuu kahden vaikutuspinnan välillä. Adhesiivista tartuntaa käytetään erittäin pienten komponenttien poimintaan, esimerkiksi elektroniikkateollisuuden tuotteiden käsittelyyn. Adhesiivinen tartunta perustuu nesteen pintajännitykseen ja käytännössä se voidaan toteuttaa kuvan 14 esittämällä tavalla. Ensimmäisessä vaiheessa tarraimeen muodostetaan nestepisara ja tarrain tuodaan siirrettävän kappaleen läheisyyteen. Neste luo komponentin ja tarraimen välille sidosvoiman, joka pitää komponentin paikoillaan tarraimen liikkeessä. Komponentin irrotus tarraimesta tapahtuu kohdistamalla siihen adhesiivista voimaa suurempi irrottava voima. Tämä voidaan toteuttaa esimerkiksi mekaanisella järjestelmällä. Adhesiivisena nesteenä käytetään yleensä itsestään haihtuvaa nestettä, jolloin työkappaleeseen ei jää näkyviä jälkiä. [Wolf & al. 2005, s. 102]



Kuva 14: Adhesiivisen tarraimen toimintaperiaate. [Wolf & al. 2005, s. 102]

”Universaali tarrain” sisältää käsitteenä ajatuksen siitä, että tarrain pystyisi mukautumaan minkä tahansa työkalun kokoon, muotoon ja materiaaliin. Yksi esimerkki tällaisesta on rakeisen materiaalin jumiutumiseen perustuva tarrain. Tarraimen rakenne muodostuu rakeisella materiaalilla täytetystä pussista, joka on perustilassa pehmeä ja joustava, sekä mukautuu kappaleen muotoihin kontaktissa. Kun pussiin muodostetaan alipaine, rakeet painautuvat toisiaan vasten ja kitka estää niitä liikkumasta. Tämä johtaa siihen, että joustava pussi muuttuu jäykäksi kontaktissa olevan kappaleen ympärille. Kuvasta 15 selviää tartunnan eri vaiheet. Tarrain siis mukautuu kappaleen muotoihin, muuttuu joustavasta kiinteäksi ja muodostaa työkaluun osittain kitkaan ja osittain muotoon perustuvan tartunnan. [Brown & al. 2010, s. 1]



Kuva 15: Rakeisen materiaalin jumiutumiseen perustuva ”universaali” tarrain. [Brown & al. 2010, s. 2]

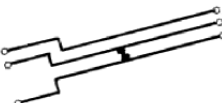


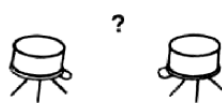

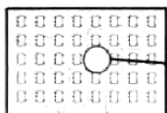
2.4 Elektroniikan laadunvalvonta ja testaus

Tässä luvussa käydään läpi työhön liittyvää teoriaa elektroniikan laadunvalvonnan ja testauksen osalta. Testausta ja testausmekaniikkaa käsitellään piirilevyjen In-Circuit (IC) testauksen osalta. Isompien elektronisten kokoonpanojen tai järjestelmien testausta tai laadunvalvontaa ei käsitellä.

2.4.1 In-Circuit testaus yleisesti

IC-testauksen tarve lähtee piirilevyn valmistuksen aikana syntyneistä virheistä, jotka vaikuttavat levyn toimintaan. Piirilevyn valmistus lähtee skemaattisen piirustuksen pohjalta tehtävistä kokoonpano ja porauspiirustuksista. Piirustuksesta selviää komponenttien sijainnit, komponenttien väliset vedot (johdotukset, kuparoinnit) ja poraukset. Piirustuksen pohjalta suoritetaan poraukset tyhjälle levyille ja kuparoinnit etsataan levyn pintaan. Komponentit ladotaan porattuihin reikiin joko käsin tai ladontakoneella. Komponenttien liittäminen levyyn tapahtuu juottamalla, esimerkiksi aaltojuotosmenetelmällä. [GenRad 1984, s. 3]

Kaikki IC-testauksessa tarkistettavat virheet liittyvät edellä mainittuihin työvaiheisiin ja niissä tapahtuneisiin virheisiin. Kuvassa 16 on esitelty yleisimpiä piirilevyn valmistuksessa esiintyviä virheitä.

Kaksi tai useampi kuparivedoista on oikosulussa, joko epäonnistuneen etsauksen tai juotoksen takia. Tämä on yksi yleisimpiä valmistusvirheitä.	
Kupariveto on poikki, jolloin piiri jää avoimeksi.	
Väärän arvoinen tai kokonaan väärä komponentti on ladottu piirilevyille.	
Komponentti on ladottu väärin päin levyille.	
Komponentilla on huono kontakti piirilevyyn, syynä yleensä katkennut tai taipunut komponentin jalka tai kylmäjuotos.	
Komponentti on jäänyt kokonaan pois levyä ladontavaiheesta.	

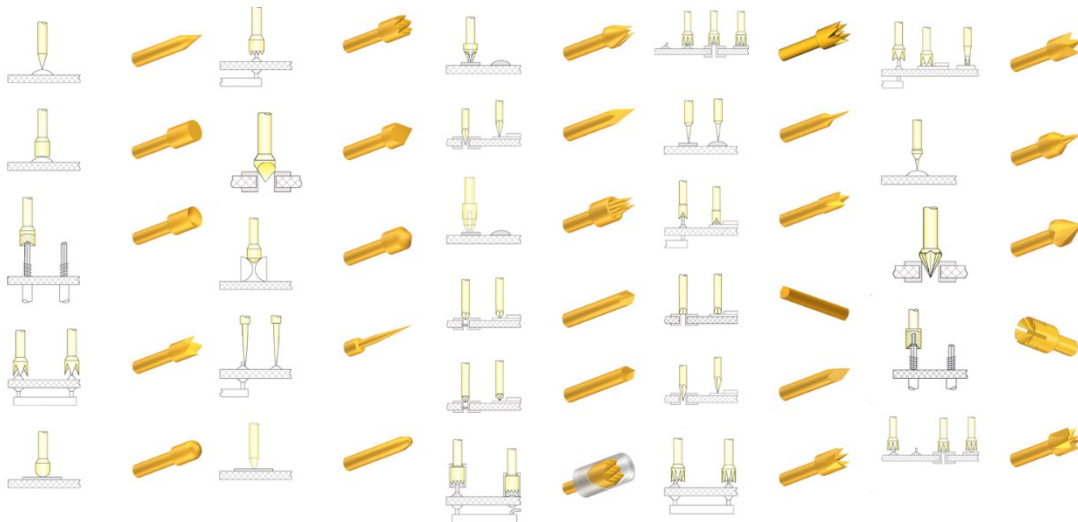
Kuva 16: Yleisimpiä piirilevyn valmistuksessa syntyneitä virheitä. [GenRad 1984, s.4]

Jotta edellä esitetyt valmistusvirheet voidaan havaita, tulee jokainen levyllä oleva komponentti ja niiden väliset liitokset testata. Periaatteessa tämä on mahdollista suorittaa käsin, mutta piirilevyjen monimutkaistessa ja komponenttien määrän kasvaessa tämä ei ole enää käytännöllistä. Käytännössä testaus suoritetaan vaihtelevan määrän automatiikkaa sisältävällä IC-testerillä. Testerit kytkeytyvät piiriin ja kuparivetoihin ja tarkistaa yksitellen näiden toiminnan. Oikosulut, avoimet vedot ja vialliset komponentit voidaan näin paikallistaa suhteellisen hyvin. Piirilevyn toimivuutta kokonaisuutena voidaan testata syöttämällä sisääntuloliittimiin signaali ja samanaikaisesti mittaamalla ulostulevaa signaalia. [GenRad 1984, s. 12]

2.4.2 Testauksessa käytettävä mekaniikka

Testausmekaniikan perustana voidaan pitää kahta periaatetta; testerin on kyettävä kytkeytymään jokaiseen levyllä olevaan solmukohtaan ja testerin on kyettävä kytkeytymään jokaiseen komponenttiin erikseen. [GenRad 1984, s. 17]

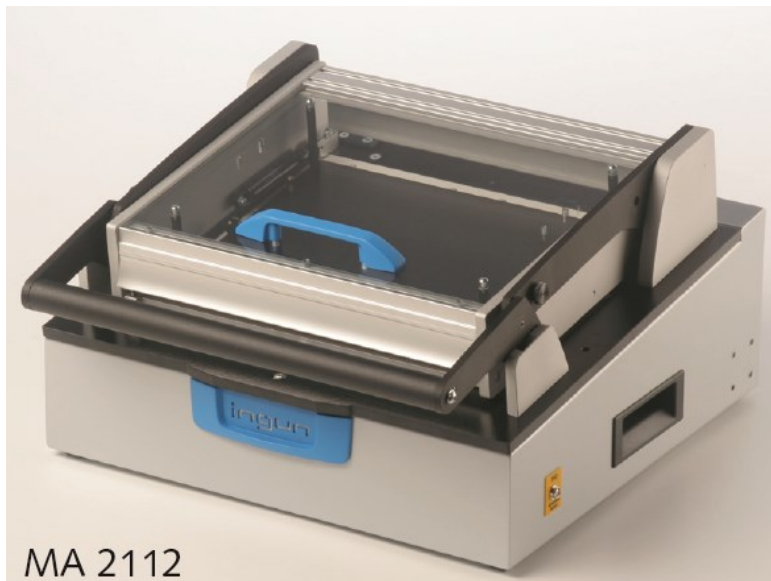
Kytkeytyminen levyyn tapahtuu testineuloilla, jotka koostuvat neulaholkista ja jousitetusta testineulasta. Testineuloja on saatavilla erilaisilla kärjillä ja kärkivalinta riippuu siitä, mihin aiotaan kontaktoitua. [GenRad 1984, s. 18] Kuvassa 17 on esimerkkejä erilaisista testineulojen kärkivaihtoehdoista. Osa testineuloista läpäisee kuparin hapettuneen pinnan paremman kontaktin saavuttamiseksi. Joissain sovelluksissa kuparointeihin ei saa jäädä näkyviä merkkejä, jolloin käytetään tylppiä testineuloja. [Ingun 2015]



Kuva 17: Erilaisia kärkivaihtoehtoja erityyppisiin testaustilanteisiin. [Ingun 2015]

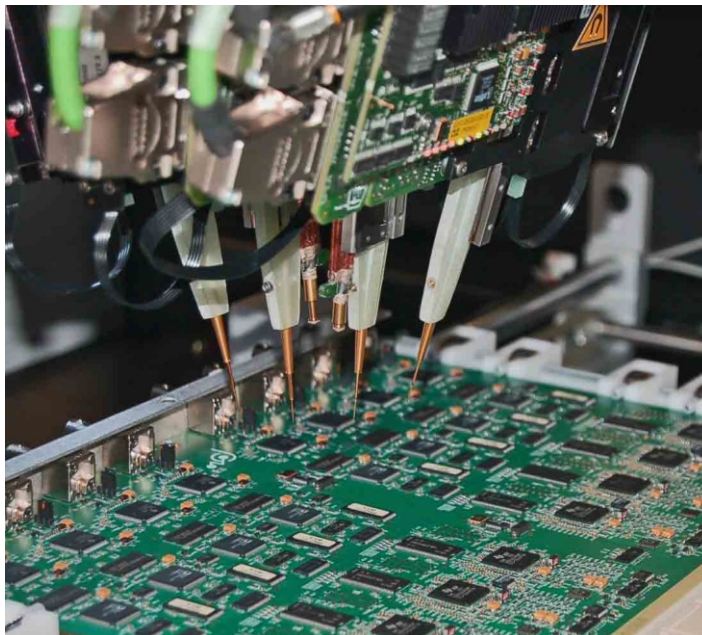
Neulatestaus voidaan suorittaa testijigin eli neulapedin (bed-of-nails) avulla, jossa testineulat ovat kiinteästi sijoitettu ja kontaktoituminen testattavaa piirilevyyn tapahtuu kaikkien testineulojen osalta samanaikaisesti. Testattava tuote painetaan testineuloja vasten tuotteen yläpuolelle sijoitettujen painimien avulla tai imemällä tuote alipaineella

testineuloja vasten. Testineulojen ja painimien sijoittelussa on omat rajoituksensa, testineuloja ei voi sijoittaa esimerkiksi liian tiheään ja painimien sijoittamisessa tulee huomioida piirilevyn pinnassa olevat komponentit ja niiden väistäminen. Kuvassa 18 on esimerkki mekaanisesta käsin käytettävästä testifikstuurista. [GenRad 1984, s. 18-19]



Kuva 18: Tyypillinen manuaalisen testifikstuurin perusrakenne. [Ingun 2014, s. 2]

Testineulat voivat olla myös liikkuvia (flying probe tester), jolloin käytetään kahta tai useampaa testineulaa. Liikkuvat testineulat ohjataan haluttuun sijaintiin testattavalla levyllä ja kytketään testattaviin pisteisiin. [Blackwell 1999, s. 9.22] Kuvassa 19 ”lentävillä testineuloilla” toimiva tester.



Kuva 19: Liikkuvilla neuloilla toimiva piirilevytesteri. [ACDI 2011]

Liikkuvilla testineuloilla varustettu testeri on kustannuksiltaan kalliimpi kuin manuaalinen testifikstuuri ja toisaalta myös hitaampi, sillä testineulojen liikkeet vaativat aikaa. Liikkuvilla testineuloilla on parempi ulottuvuus kuin kiinteästi asetetuilla testineuloilla ja testipisteet voidaan sijoittaa lähemmäs toisiaan, kun testineulatiheys ei ole rajoittavana tekijänä kuten neulapedeissä. [Blackwell 1999, s. 9.22-23]

3 Konseptisuunnittelun ja tuotekehityksen menetelmät

Tässä luvussa käsitellään systemaattiseen tuotekehitykseen ja konseptisuunnitteluun liittyviä vaiheita. Tämän lisäksi esitellään työvaiheisiin käytettäviä menetelmiä ja järjestelmiä ja läpikäydään jokaisesta vaiheesta saatava työn konkreettinen tulos. Työvaiheisiin liittyvää dokumentaatiota esitellään myös.

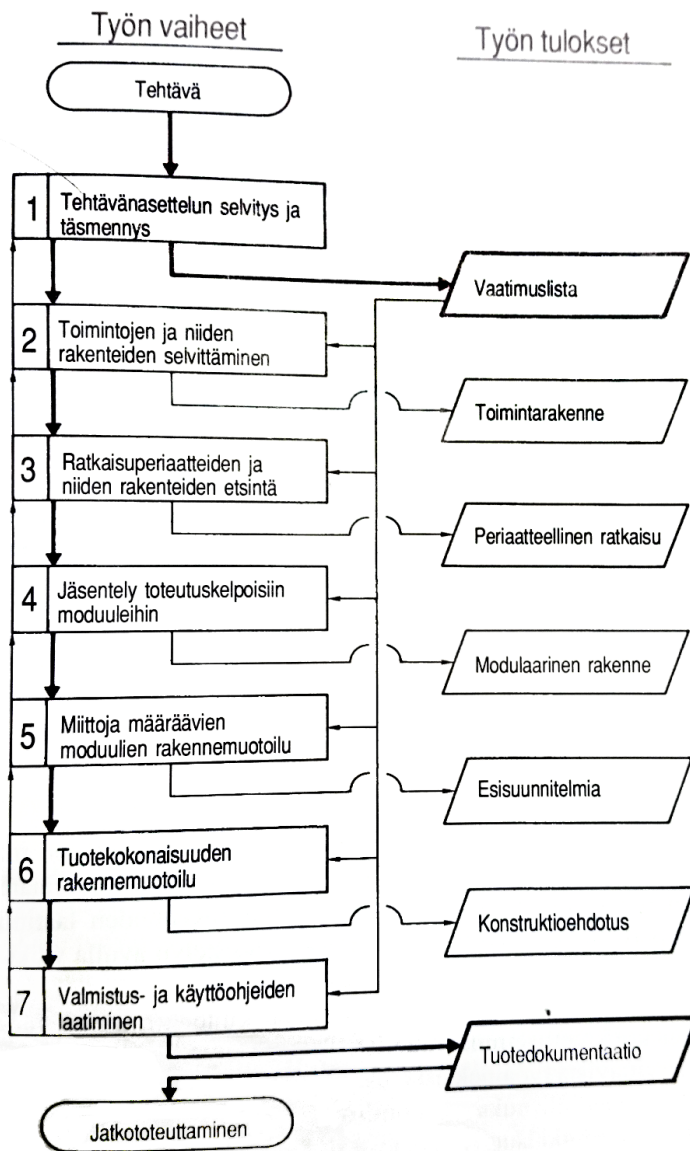
3.1 Systemaattisen konseptisuunnittelun vaiheet

Systemaattisen konseptisuunnitteluohjeen tarkoituksena on luoda suunnittelijalle johdonmukainen polku välitavoitteineen lopullisen tuotteen saavuttamiseksi. Suunnitteluohjeen pohjana toimii suunnittelutiede, kognitiivinen psykologia ja käytännön kokemukset. Suunnitteluohje sitoo yhteen yksittäiset tehtävät, työvaiheet, sisällön ja organisaation. Tämän lisäksi se sisältää strategian ja pääperiaatteet haluttujen tavoitteiden saavuttamiseksi ja yksittäisten ongelmien ratkaisemiseksi. Vaikka suunnitteluohje ja siihen liittyvät työvaiheet ja -tehtävät on tarkasti määriteltyjä, sen ei ole tarkoitus estää tai rajoittaa suunnittelukokemuksen ja intuition osuutta prosessissa. Suunnitteluohjeen tarkoitus on luoda järjestelmälliset puitteet uuden luomiselle ja tehostaa ideointiprosessia. [Pahl & Beitz 1990, s. 6]

Uusien ratkaisujen ideointi mielletään usein hyvin hetkelliseksi ja hallitsemattomaksi tapahtumaksi, eli käsillä olevaan ongelmaan sopiva ideaalinen ratkaisu saattaa syntyä milloin tahansa, mutta harvoin juuri toivottuna ajankohtana. Tällaista ajattelua ja työskentelytapaa kutsutaan intuitiiviseksi ja se on hyvin usein riippuvainen suunnittelijan lahjakkuudesta ja soveltuvuudesta kyseiseen toimintaan. Tämän lisäksi tulisi huomioida se, että suunnittelijan ideoimia ratkaisuja ohjaa henkilökohtaiset osaamis- ja asiantuntijuusalueet. [Pahl & Beitz 1990, s. 35]

Usein ei ole mahdollista odottaa intuitiivisen ratkaisun syntymistä, vaan suunnittelu- ja ideointiprosessi pitää pakottaa käyntiin muilla keinoilla. Tällöin kyseessä on diskursiivinen ajatteluprosessi, jossa tietoisesti ja järjestelmällisesti käsitellään ratkaistavia ongelmia. Diskursiivisen työtavan pohjana toimii usein pienin työaskelin etenevä prosessi, jossa jokaisessa vaiheessa suoritetaan analysointia, saadaan palautetta, tehdään muutoksia ja suoritetaan uudelleenarviointia. Intuitiiviseen prosessiin verrattuna diskursiivinen projekti etenee pienin askelin ja hitaasti, mutta toisaalta prosessi on paremmin hallittavissa kuin hetkellisestä inspiraatiosta kiinni oleva välähdyksenomainen ajatus. [Pahl & Beitz 1990, s. 35]

Edellä mainituista pienin askelin etenevistä iteratiivisista työvaiheista päästään varsinaiseen systemaattiseen suunnitteluun ja sen eri vaiheisiin. Kuvassa 20 on esitetty saksalaisen VDI 2221 (Verein Deutscher Ingenieure) standardin mukainen suunnitteluprosessi ja siinä syntyvät välitulokset.



Kuva 20: Yleispätevä malli suunnittelun työvaiheista. [Pahl & Beitz 1990, s. 47]

Kun kuvassa 20 olevaa kaaviota lähdetään avaamaan pienempiin osatehtäviin, päästään seuraaviin käytännön tason työaskeliin. [Pahl & Beitz 1990, s. 162-172]

1. Tehtävänasettelun selvitys ja vaatimuslistan laatiminen
2. Abstrahointi ja oleellisten ongelmien tunnistaminen
3. Toimintorakenteen laatiminen
4. Ratkaisuperiaatteiden etsiminen osatoimintojen toteuttamiseksi
5. Sopivien vaikutusperiaatteiden valinta
6. Konkretisointi
7. Ratkaisujen arvostelu
8. Tulos.

Tehtävänasettelu voi tulla suunnittelijalle erilaisissa muodoissa ja eri tahoilta. Lähtökohtana voi olla asiakkaan antama kehitystehtävä/tuoteidea tai kehityspyyntö voi tulla yrityksen sisältä. Tehtävänasettelu voi tulla myös konkreettisena tilauksena tai se voi perustua yrityksen muilta osastoilta tulleeseen palautteeseen. Oleellista on se, että tehtävänasettelun lähtötiedot voivat tulla monessa muodossa ja usein on tarpeen suorittaa suunnittelijan taholta lisäselvitystä siitä, mitä todella halutaan ratkaista ja mitä piirteitä ongelmaan liittyy. Tämän selvityksen pohjalta päästään vaatimuslistan laatimiseen. [Pahl & Beitz 1990, s. 62-63]

Vaatimuslista saattaa alustavassa muodossa sisältyä jo tilaukseen tai tuoteideaan. Oleellista on se, että tehtävänasettelua selvitetessä on käyty mahdollisimman laajalti läpi kaikki tuotteeseen liittyvät tekijät, eli on tehty ns. pohjatyö tarpeeksi kattavana. Vaatimuslista koostuu tehtävänasettelussa selvitetyistä työlle asetetuista tavoitteista ja vaatimuksista, jotka on koottu pakollisiksi vaatimuksiksi ja toivomuksiksi. Ratkaisun tulee täyttää kaikki asetetut vaatimukset kaikissa oloissa ja mikäli yksikin vaatimus jää toteutumatta, ratkaisuvaihtoehto hylätään. Toivomukset pyritään toteuttamaan mahdollisuuksien mukaan, esimerkiksi budjetin tai muiden ominaisuuksien sallimissa rajoissa. Toivomuksien suhteen käytetään usein myös eri tärkeysasteita. [Pahl & Beitz 1990, s. 63-64]

Vaatimukset ja toivomukset tulee esittää vaatimuslistassa yksiselitteisessä muodossa ja täsmällisesti. Käytännössä tämä tarkoittaa halutun ominaisuuden yksiselitteistä ilmaisua ja siihen liittyvän raja-arvon esittämistä numeerisessa muodossa. Aina tämä ei ole kuitenkaan mahdollista ja joudutaan turvautumaan sanalliseen muotoiluun arvon tai suorituskyvyn suhteen. Listassa esitetyt asiat on hyvä ryhmitellä aihealueittain (esim. geometria, turvallisuus, materiaalia jne.) ja vaatimuksen lähde on hyvä merkitä vaatimuksen yhteyteen mahdollisia lisäselvityksiä varten. Kuvassa 21 on esimerkki vaatimuslistan muotoilusta ja siellä esitettävistä vaatimuksista ja toiveista. [Pahl & Beitz 1990, s. 64-68]

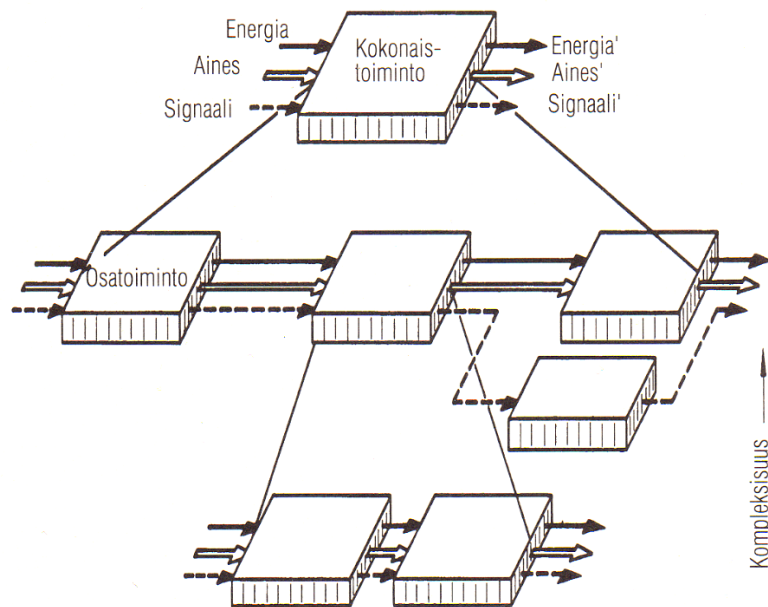
2.painos 20.8.73.			
DARMSTADTIN TKK Konetekn.os		VAATIMUSLISTA Yksioteseikoittajaa varten	Lehti:1 Siv:1
Muutos	V T	Vaatimukset	Vast.
	V	1. Virtausmäärä (sekoitettuna) max 10 l/min, 2:n baarin paineella ennen sekoittajaa	
	V	2. Max.paine 10 baaria (koepaine 15 baaria DIN 2401:n mukaan).	
	V	3. Veden lämpötila norm. 60 C° max.100 C° (lyhytaik.)	
	V	4. Lämpötilan asettelu riippumaton läpivirtauksesta ja paineesta.	
	T	5. Sallittu lämpötilavaihtelu ± 5 C° lämpimän ja kylmän tulo veden paine-eron vaihdellessa ± 0.5 baaria.	
	V	6. Liitokset: 2 x Cu-putki 10 x 1 mm, L= 400mm.	
	V	7. Yksireikäinen kiinnitys $\varnothing 35 \pm 2$ mm, altaan läpäisy paksuus 0 - 18 mm, altaan mitat otettava huomioon (DIN EN 31, DIN EN 32, DIN 1368)	

Kuva 21: Ote vaatimuslistan muotoilusta ja siinä esitettävistä asioista. [Pahl & Beitz 1990, s. 163]

Seuraavassa työvaiheessa, abstrahoinnissa, pyritään muotoilemaan ratkaistava ongelma yleiseen muotoon ja saamaan selville ongelman ydin eli se, mihin todella halutaan ratkaisu. Tämän toiminnon tarkoituksena on edistää optimaalisen ratkaisun löytymistä estämällä ennakkoon syntyneet mielikuvat ja keinot mahdollisista konstruktioista. Ajatuksena on mahdollisuuksien mukaan viedä ongelma jopa puhtaasti fysiikan perusilmiöiden tasolle, jolloin ongelmaan voidaan löytää paljon uusia periaatteellisia ratkaisuja. Käytännössä yksi tapa suorittaa abstrahointi, on käyttää pohjana edellisessä vaiheessa luotua vaatimuslistaa. Vaatimuslistasta karsitaan toivomukset ja epäoleelliset vaatimukset pois. Vaatimuksissa olevat numeeriset arvot muutetaan sanalliseen muotoon laadullisiksi ja vaatimuksia muokataan yleisempään muotoon ja niiden merkitystä laajennetaan. Näiden toimenpiteiden pohjalta pyritään muotoilemaan perusongelma neutraaliin muotoon, mahdollisesti jopa tiivistämään se yhteen lauseeseen. Lopputuloksen neutraaliutta ei voi tarpeeksi korostaa, sillä abstrahoinnin tarkoituksena on päästä eroon suunnittelua liikaa ohjaavista ennakkokäsityksistä. [Pahl & Beitz 1990, s. 72-74]

Ydinongelman ratkaisun toteuttamiseksi on konstruktion toiminta syytä jakaa osiin, jotka ovat keskenään vuorovaikutuksessa. Käytännössä abstrahoinnissa selvitetyn ydinongelman perusteella luodaan toiminnallinen riippuvuus konstruktion tulo- ja lähtösuureiden välillä. Kokonaistoiminto voidaan jakaa pienempiin osiin, osatoimintoihin. Osatoimintojen tarkoituksena on selkeyttää konstruktion toimintaa ja osatoimintoja yhdistämällä saadaan toimintorakenne. Toimintorakenteessa kuvataan osatoimintojen välisiä riippuvuuksia energia-, materiaali- ja signaalivirtausten osalta. Kuvassa 22 on periaatekuva kokonaistoiminnosta ja sen jaosta osatoimintoihin ja alempiin rakenteisiin. Osatoimintojen tasojen määrä vaihtelee tilanteesta riippuen. Yleistä on, että täysin uusia konstruktioita suunnitellessa ei kaikki osatoimintojen

yksityiskohdat ole kokonaan tiedossa. Mikäli kyse on vanhaan tuotteeseen tehtävästä muutostyöstä, osatoiminnot ja niiden väliset suhteet ovat yksityiskohtaisesti tiedossa. Modulaarisissa tuotteissa toimintorakenne mukaillee hyvin tarkasti tuotteen aineellista rakennetta ja sen osia. Toimintorakenne mahdollistaa tuotteen yksittäisten osasysteemien kehittämisen toisistaan erillään. Mikäli kyseessä on erittäin monimutkainen tuote, on mahdollista, että eri moduulien kehitys tapahtuu eri työryhmien toimesta. Tällöin toimintorakenne auttaa hallitsemaan kehitystyötä, kun osatoimintojen väliset liittymäkohdat ovat tiedossa. [Pahl & Beitz 1990, s. 81-83]



Kuva 22: Toimintorakenteen periaatekuva. [Pahl & Beitz 1990, s. 82]












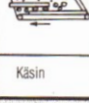

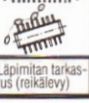

Kun osatoiminnot ovat selvillä, käydään ne yksitellen läpi samalla selvittäen toiminnan taustalla oleva vaikutusperiaate. Tähän sisältyy toiminnan kannalta oleellinen fysikaalinen ilmiö sekä geometriaan ja materiaaliin liittyvät ominaispiirteet. Näiden selvittämiseen voidaan käyttää monia erilaisia menetelmiä. Lopputuloksena pitäisi kuitenkin saada monia erilaisia toteutustapoja osatoimintoa kohden joka tarkoittaa sitä, että sama osatoiminto voidaan toteuttaa useaan eri fysikaaliseen ilmiöön perustuvalla tavalla ja geometriset ja materiaaliset peruseriaatteet voivat vaihdella. Vaikutusperiaatteita voidaan etsiä tutkimalla kirjallisuutta, esimerkiksi alan julkaisuja, kilpailijoiden tuote-esitteitä ja patenteja. Ratkaisuja voidaan löytää myös tunnetuista järjestelmistä, tutkimalla valmiiden laitteiden rakennetta. Myös analogiaa erilaisiin luonnossa esiintyviin järjestelmiin kannattaa hyödyntää. Hyödyllistä tietoa tarjoavat myös mittaukset ja mallikokeet. [Pahl & Beitz 1990, s. 99-103]

Kaikki edellä mainitut menetelmät edellyttävät aktiivista tiedonhakua, mutta kuten aikaisemmin on jo mainittu, ongelmanratkaisussa on myös intuitiivinen puoli. Siihen kuitenkin liittyy ongelmakohtia, kuten sen satunnaisuus, suunnittelijan henkilökohtaiset taipumukset ja käsillä olevan informaation määrä. Parhaimmillaan intuitiivinen ajattelu antaa kuitenkin nopeasti optimaalisen tai lähellä optimaalista olevan ratkaisun, joten sitä

ei ole syytä hylätä ongelmanratkaisumenetelmänä. Intuitiivista ongelmanratkaisua voidaan tehostaa antamalla aivoille erilaisia virikkeitä ja ärsykeitä idean syntymiseen. Käytännössä tämä tapahtuu erilaisin vuorovaikutuskeinoin, jossa ideoita päästään vapaasti antamaan ja jalostamaan ryhmässä. [Pahl & Beitz 1990, s. 103-109]

Vaikutusperiaatteiden etsimisessä voidaan käyttää myös diskursiivisia menetelmiä, joissa ongelma jaetaan pienempiin osiin ja sitä käsitellään järjestelmällisesti. Yleisesti ottaen diskursiivista menetelmää suositellaan yksittäisten ongelmien ratkaisuun, ei kokonaisratkaisun löytämiseen. Mikäli tunnetaan taustalla vaikutta fysikaalinen ilmiö, voidaan siihen liittyviä suureita tarkastelemalla löytää muuttujien välisiä riippuvuuksia. Ongelman ratkaisussa voidaan käyttää myös hyödyksi erilaisia jäsentelykaavioita, jossa ilmiöiden, rakenteiden tai suureiden välisiä yhteyksiä on kerätty taulukkoon. On olemassa myös erilaisia konstruktio luetteloita, jonne on kerätty mahdollisia rakenteellisia ratkaisuja erilaisten toimintojen suorittamiseksi. [Pahl & Beitz 1990, s. 109-125]

Edellisessä vaiheessa haettiin ratkaisuvaihtoehtoja yksittäisten toimintojen suorittamiseen. Jotta saavutetaan alun perin määritelty kokonaistoiminto, tulee näistä osatoimintavaihtoehtoista yhdistellä vaatimukset täyttävä kokonaisuus. Mikäli osatoimintojen löytämiseen on käytetty intuitiivisia menetelmiä, on mahdollista että samalla on syntynyt ajatus toimivasta kokonaisratkaisusta. Yleisellä tasolla tarkasteltaessa osatoimintojen yhdistelyssä tulisi huomioida niiden fysikaaliset yhteensopivuudet, jotta toimintorakenteessa määritellyt materiaali-, energia- ja signaalivirrat saadaan yhteensopiviksi. Toinen huomioitava seikka on teknillisesti ja taloudellisesti edullisen tai ylipäättään mahdollisen kombinaation muodostaminen. Apuna järjestelmällisessä kokonaistoimintojen muodostamisessa voidaan käyttää morfologista laatikkoa (kuvassa 23), jossa eri osatoimintovaihtoehdot on esitetty kuvallisesti tai sanallisesti. [Pahl & Beitz 1990, s. 129-133]

Ratkaisut		1	2	3	4	...
Osatoimin- not	1 Nostaa					...
		ja paino- tela	ja paino- tela	ja paino- tela	Painotela	
	2 Seuloo					...
		Seulaketju	Seularitiä	Seularumpu	Seulapyörä	
	3 Erottaa varret			
		Pe Va	Pe Va	Erötustela		
	4 Erottaa kivet					...
	5 Lajitella perunat	Käsin	Kirkalla (vino pinta)	Läpimitan tarkas- tus (reikälevy)	Painon tarkastus (punnitus)	...
	6 Koota perunat	Kaatosäiliö	Telapohjainen säiliö	Poistosäkkilaitte

↓ Periaateyhdistelmä

Kuva 23: Esimerkki morfologisesta laatikosta, jossa osatoimintojen eri ratkaisumallit esitetään ja yhdistetään kokonaisratkaisuksi. [Pahl & Beitz 1990, s. 130]

Kuten aikaisemmin todettiin, ei osatoimintoja voida yhdistellä täysin satunnaisesti, vaan muutamia perusperiaatteita on hyvä noudattaa. Osatoiminnot voidaan jo alustavasti järjestää morfologiseen laatikkoon niiden perusominaisuuksien mukaan, esimerkiksi energiamuodon mukaan. Yhdistelmiä tehdessä on syytä muistaa osatoimintojen yhteensopivuus ja se, että osatoiminnot ja kokonaisratkaisu noudattavat vaatimuslistaa. Myös kustannukset tulee huomioida. Kokonaisratkaisuja voi näin syntyä melko suuri määrä ja usein jo tässä vaiheessa on syytä tehdä karkeaa karsintaa ja pistää merkeille optimaalisimmilta vaikuttavat vaihtoehdot ja tehdä näille lisäanalyysia. Analysoinnissa voidaan esimerkiksi käydä osatoiminnot läpi ja merkitä lisäkehitystä vaativat ratkaisut, jolloin päästään lähemmäs valmista periaatetason ratkaisukokonaisuutta. [Pahl & Beitz 1990, s. 133-134]

Kokonaisratkaisut ovat tässä vaiheessa vielä liian teoreettisella tasolla, joten lopullista arviointia ei voida suorittaa ennen kuin konstruktion toimintaperiaate on kokonaisuudessaan hahmoteltu. Konkretisoinnilla pyritään helpottamaan lopullista arviointia ja saamaan esiin oleellisia tietoja myös rakennemuotoilusta. Kaikkia vaihtoehtoja ei välttämättä ole syytä konkretisoida, vaan konkretisointiprosessin vaatiman suuren työmäärän takia vain lupaavimmat yhdistelmät konkretisoidaan. Käytännön tasolla konkretisointi toteutetaan yksinkertaistetuilla laskelmilla, karkean mittakaavan luonnoksilla, mallikokeilla, matemaattisilla malleilla ja simuloinneilla. Myös valmista tietoa konstruktion osista ja käytännön tason toiminnasta voi löytyä markkina-, patentti- ja kirjallisuustutkimuksen avulla. [Pahl & Beitz 1990, s. 138-140]

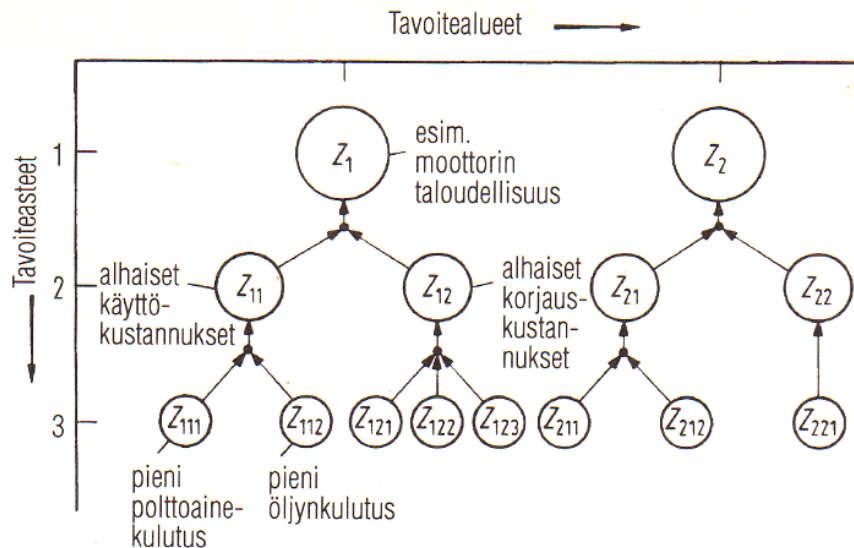
Kun ratkaisuvaihtoehdot on saatu konkreettisemmalle tasolle, ne pitäisi laittaa perustellusti paremmuusjärjestykseen jatkokehitystä varten. Käytännön tasolla käytetään yleensä pistearviointia, jossa halutut ominaisuudet painotetusti pisteytetään. Pistearviointijärjestelmän tulisi olla tarpeeksi laaja ja ottaa huomioon oikeassa suhteessa kaikki konstruktion liittyvät yleiset vaatimukset. [Pahl & Beitz 1990, s. 140] Esimerkki tällaisesta järjestelmästä on VDI 2225 mukainen teknillis-taloudellinen arviointi, joka etenee seuraavasti:

1. Arviointikriteerien muodostaminen
2. Arviointikriteerien painotus
3. Ominaisuuksien määrittäminen
4. Arvioinnin suorittaminen sopivalla asteikolla
5. Kokonaisarvon määrittäminen
6. Ratkaisumuunnelmien vertailu
7. Arvostelun epätarkkuuden arviointi
8. Heikkojen kohtien etsiminen konstruktiosta.

Ensimmäisessä vaiheessa pyritään vaatimuslistaa ja yleisiä ehtoja käyttäen muodostamaan halutut tavoitteet konstruktiolle. Perusperiaatteena on, että asetetut tavoitteet olisivat riippumattomia toisistaan siten, että tavoitteeseen vaikuttavan ominaisuuden parantaminen ei vaikuttaisi muihin tavoitteisiin. Tavoitteet tulisi mielellään esittää numeerisesti, mutta mikäli tämä ei ole mahdollista myös riittävän perusteellinen sanallinen muotoilu riittää. Tavoitteista saadaan yleensä suoraan

muotoiltua arviointikriteerit. Tässä tulee huomioida se, että kriteereillä tulee olla keskenään yhtenäinen arvosuunta jolloin pisteytyksen suorittamisessa ei synny epäloogisuuksia. [Pahl & Beitz 1990, s. 141]

Arviointia tehdessä tulee myös huomioida se, että kaikki arviointikriteerit eivät välttämättä ole yhtä tärkeitä. Jo vaatimuslistan pohjalta voidaan tehdä karkeaa painotusta vaatimusten ja toiveiden suhteen. Painoarvot voidaan määrittää esimerkiksi tavoitejärjestelmän avulla (kuva 24), jossa päätavoite jaetaan alempiin tasoihin ja näille jaetaan suhteellinen painoarvo. Tämä tarkoittaa sitä, että alitavoitteille suoritetaan keskinäistä puntarointia. Tavoitejärjestelmän etuna on se, että on helpompaa suorittaa painoarvojen jakoa vertailemalla muutamia alitavoitteita kerrallaan kuin yrittää jakaa kaikille todennukaiset painoarvot kerralla. VDI 2225:n mukaan lähtökohtaisesti pyritään jakamaan painoarvot ilman punnitusta arvioimalla mitkä kriteerit ovat keskenään suunnilleen samanarvoisia. [Pahl & Beitz 1990, s. 142-143]



Kuva 24: Tavoitejärjestelmä pisteytyksessä. [Pahl & Beitz 1990, s. 142]

Kuten aikaisemmin todettiin, arviointikriteerit tulisi muotoilla siten, että niiden perustana on jokin numeerisesti mitattava arvo. Tässä työvaiheessa valitaan jokaisen arviointikriteerin kohdalle ominaisuus, jossa kyseinen ominaisuus ilmoitetaan. Sanallisten arvioiden suhteen pyritään riittävään tarkkuuteen. [Pahl & Beitz 1990, s. 143-144]

Seuraavana työvaiheena on arvioinnin suorittaminen sopivalla pisteasteikolla. Pisteasteikko valitaan yleensä välillä 0-10 tai VDI 2225 suosituksen mukainen 0-4. Kymmenjärjestelmä on helpompi hahmottaa prosentteihin, mutta pienempi ja karkeampi arvoasteikko on perusteltu siten, että konstruktiio on kuitenkin vielä epämääräisessä vaiheessa ja riittäviä perusteita tarkkaan arvosteluun ei ole. Arviointia tehdessä on syytä olla myös tiedossa pisteitä vastaava sanallinen kuvaus. [Pahl & Beitz 1990, s. 145-147]

Seuraava vaihe on itsessään melko yksinkertainen. Konstruktion saamat pisteet lasketaan yhteen, ja mikäli arvioinnissa on käytetty painotuksia, myös ne huomioidaan laskennassa. Tästä päästään suoraan ratkaisumuunnelmien vertailuun, johon löytyy muutamia eri tapoja. Käytännössä yksinkertaisimmillaan konstruktioit laitetaan paremmuusjärjestykseen niiden saaman kokonaispistemäärän perusteella, jolloin niitä voidaan vertailla suhteellisesti keskenään. Vertailu voidaan suorittaa myös suhteuttamalla kokonaispisteet kuviteltuihin maksimipisteisiin nähden. Usein on myös hyödyllistä pitää erillään teknillisten vaatimusten ja taloudellisten vaatimusten pisteytys. [Pahl & Beitz 1990, s. 147-151]

Arvostelua ei kuitenkaan voida pitää absoluuttisen tarkkana ja mikäli siihen sisältyy suuria virheitä, ei konstruktion valinnassa päädytä optimaalisimpaan tulokseen. Käytännön tasolla virheet ovat lähtöisin joko arvostelijan toiminnasta tai arvostelumenetelmän vajavaisuudesta. Arvostelijan taustat vaikuttavat näkemyksiin ja tästä syystä olisi hyvä käyttää useampaa eritaustaista henkilöä arvostelun suorittamiseen. Myös arvosteltavat ratkaisut tulisi esittää neutraalissa muodossa. Arvostelu tulisi suorittaa yhden kriteerin osalta samanaikaisesti kaikille ratkaisumuunnelmille. Virhelähteenä voi toimia myös arviointikriteerien valinta. Tulee myös muistaa, että ratkaisumuunnelmat ja niihin liittyvät ominaisuudet ovat vasta teorian tasolla ja näin ollen sisältävät itsessään jo epätarkkuutta. [Pahl & Beitz 1990, s. 152-153]

Viimeinen vaihe on arvosteltujen ratkaisumuunnelmien analysointi heikkojen kohtien osalta. Käytännössä tarkastellaan konstruktion yksittäisiä osa-alueita, jotka ovat saaneet keskimääräistä heikommat pisteet. Näiden tarkastelujen pohjalta voidaan konstruktioita kehittää ja tätä on syytä harjoittaa erityisesti silloin, kun lupaavasta ratkaisumuunnelmasta löytyy yksittäisiä heikkoja alueita. [Pahl & Beitz 1990, s. 153-154]

4 Tarraimen konseptisuunnittelu

Ennen kuin oli edes tiedossa, että suunniteltava tuote tulee olemaan tarrain, suoritettiin markkinatutkimusta automaation ja robotiikan alan ja kehitystrendien suhteen potentiaalisen kohteen löytämiseksi. Tätä varten käytiin läpi alan yrityksiä ja niiden sovelluksia sekä erilaisia julkaisuja ja vielä kehitysasteella olevia sovelluksia. Lopulliseen valintaan vaikuttivat käytössä olevat resurssit ja yrityksen tavoitteet. Käsillä olevista vaihtoehdoista päädyttiin lopulta tarraimen suunnitteluun ja tälle valinnalle tärkeimpänä perusteena toimi potentiaalisten markkinoiden suuruus ja toisaalta sen toteutettavuus kohtuullisilla resursseilla.

4.1 Yrityksen konseptille asettamat tavoitteet ja rajaukset

Lähtötilanteena työlle toimi yrityksen tavoite laajentaa toimialaansa robotiikkaan ja saada perustiedot tarrainsuunnitteluun. Yritykseltä puuttui myös systemaattinen malli tuotekehitykselle ja konseptisuunnittelulle. Työn sivutuotteena haluttiin saada kehitettyä yrityksen käytäntöjä tämän suhteen ja luoda pohja, jota voitaisiin hyödyntää myös tulevaisuudessa kehitysprojekteissa. Valmiita askelittain eteneviä ohjeita on toki olemassa, mutta tavoitteena oli löytää juuri tälle yritykselle sopivimmat toimintamallit ja työtavat.

Työlle ei ollut varsinaista asiakasta tai tilaajaa, vaan se suoritettiin yrityksen toiminnan kehittämiseksi ja osaamisen laajentamiseksi. Tämä asetti haasteita käytännön tason tavoitteiden asettamiseen, sillä asiakkaan puuttuminen antoi tiettyjä vapauksia toteutuksen suhteen. Toisaalta tämä myös rajoitti työhön käytettäviä resursseja kustannusten suhteen, sillä asiakkaan puuttuessa ei työstä voida laskea saatavaksi suoria tuloja.

Yrityksen tietotaidon laajentamisen lisäksi tavoitteena oli saada valmistettavasta prototyypistä esittelykelpoinen kappale erilaisiin esittely- ja messutilaisuuksiin. Tarraimen toiminnasta ja sillä suoritettavista tehtävistä haluttiin kuvata myös video yritykselle, jota voitaisiin hyödyntää markkinointi- ja esittelytilaisuuksissa.

4.2 Tiedonhaku ja markkinatutkimus

Tarrainten osalta tiedonhaussa painotettiin tämänhetkisten tarrainvalmistajien ratkaisuja ja tarkasteltiin olemassa olevia sovelluksia kappaleenkäsittelyrobottien osalta. Tällä pyrittiin saamaan käsitys vallitsevasta tilanteesta ja toisaalta myös tarrainten suorituskyvystä erimuotoisten, erikokoisten ja erilaisista materiaaleista valmistettujen kappaleiden siirtelyssä. Tässä vaiheessa tutustuttiin myös tarrainten kannalta oleellisimpien osien teknisiin ratkaisuihin ja niiden valmistajiin. Näiden tutkimusten perusteella pyrittiin selvittämään tarraimen toiminnan osalta kriittisimmät paikat ja toiminnot.

Tiedonhaku ei keskittynyt pelkästään tarraimiin, vaan yleispiirteistä selvitystä suoritettiin myös robottien ja robottisolujen suhteen, tarkoituksena saada yleiskuva toimintaympäristön ja siihen liittyvien oheislaitteiden ominaisuuksista. Tässä tapauksessa tarkasteltiin eri vaihtoehtoja palettien ja osien syöttöjärjestelmien suhteen sekä robottisolua tuotantolinjan osana. Myös robotin ja tarraimen väliseen rajapintaan liittyviä teknisiä ratkaisuja haettiin. Koska työssä sivuttiin myös kokoonpanoa, etsittiin myös robotisoituun kokoonpanoon liittyvää aineistoa lähinnä tuotesuunnittelun näkökulmasta, vaikkakin tämän osa-alueen käsittely ei ollut priorisoitu kovin korkealle.

Tiedonhaussa ja markkinatutkimuksessa hyödynnettiin pääasiassa internet lähteitä eri muodoissaan (tieteelliset julkaisut, standardit, kaupalliset esitteet ja videot erilaisista sovelluksista). Tarkoituksena oli saada ajan tasalla oleva kuva nykyisestä tasosta. Sähköisten lähteiden lisäksi perustason lähes muuttumatonta tietoa etsittiin alan kirjallisuudesta.

Tiedonhaku ei keskittynyt pelkästään kirjalliseen dataan ja median eri muotoihin, vaan käytännön tason kokemuksia tekniikasta haettiin muun muassa Teknologia15- ja Alihankinta 2015- messuilta. Messujen kautta luotiin myös kontakteja potentiaaliin laitetoimittajiin, joihin oltiin yhteydessä työn edetessä ja suoritettiin vierailuja tuotteisiin tutustumisen merkeissä.

Tiedonhaun ja markkinatutkimuksen perusteella saatiin myös lopullisen konseptin perusidea muotoiltua. Konsepti koostuisi piirilevyn IC-testauksen mekaanisesta suorittamisesta, kokoonpanosta koteloon ja näihin vaiheisiin liittyvästä kappaleenkäsittelystä robotilla.

4.3 Vaatimuslistan luominen

Vaatimuslistaa luodessa hyödynnettiin tiedonhakuvaiheessa selvinneitä tarraimen toiminnan kannalta kriittisiä pisteitä ja näiden perusteella luotiin yleiset vaatimukset tarraimen osalta. Robottien ja niiden käyttämien työkalujen suhteen on asetettu vaatimuksia standardeissa, jotka voitiin melko suoraan siirtää sellaisenaan vaatimuslistaan. Piirilevyn testaukseen ja yleisiin ominaisuuksiin liittyvät vaatimukset luotiin yrityksen oman aiheeseen liittyvän tietotaidon perusteella. Käytössä olevien resurssien perusteella tehtiin myös joitain vaatimuksia ja rajoituksia työn suhteen.

Vaatimuslista päivittyi asiaankuuluvasti työn edetessä sen mukaan, kun uutta tietoa tai resursseja tai niiden rajoituksia tuli ilmi. Toisaalta oli myös asioita, joita ei suoraan kirjattu vaatimuslistaan vaan niitä pidettiin yleisinä ohjenuorina työtä tehdessä. Esimerkiksi toimintaa ohjasi hyvin paljon se, että työstä oli tarkoituksena saada sivutuotteena kehitettyä yrityksen tuotekehitysmalleja ja löytää yrityksen käyttöön sopivimmat toimintatavat. Lopputavoitteena ei myöskään ollut täysin viimeistelty tuote vaan prototyyppi, ja tämä osaltaan ohjasi muun muassa teknisiä ratkaisuja työssä.

4.3.1 Vaatimukset

Osa vaatimuksista perustuu suoraan teollisuusrobottistandardeissa esitettyihin vaatimuksiin ja osa vaatimuksista syntyi käytännön tason tarpeista ja käytössä olevista resursseista. Toisaalta vaatimusten määrä pyrittiin pitämään mahdollisimman pienenä, jotta tarpeettomia kohtia vaatimuslistaan ei syntyisi. Vaatimuslistan (taulukko 3) kohdat on luokiteltu vaatimuksiin (V) ja toiveisiin (T) ja mahdollisuuksien mukaan on vaatimusten yhteyteen liitetty numeeriset rajaukset.

Taulukko 3: Testeritarraimen vaatimuslista, vaatimukset ryhmiteltynä aihepiireittäin

Vaatimus	Luokitus
Yleiset vaatimukset	
Toimilaitteiden liikkeet ovat kokonaisuudessaan ohjattavissa robotin ohjausrajapinnan kautta	V
Voimanlähde pneumaattinen (max 7 bar) ja/tai sähköinen (24 V)	V
Kaikki mekaaniset toiminnot tarraimessa ts. ei tarraimen ulkopuolisia toimilaitteita kuten kappaleensyöttimiä (pois lukien kiinteät paletit ja rakenteet)	T
Pystyy käsittelemään mitoiltaan 85x56x1,3 mm piirikorttia (Raspberry Pi 2)	V
Tarraimen ja työkappaleen massa ei saa ylittää robotin kantokykyä (ISO 10218-2:2011(E) 5.3.10 B)	V
Turvallisuus	
Robotin hätäpysäytyksen tulee pysäyttää myös tarraimen liike (ISO 10218-2:2011(E) 5.3.8.3)	V
Hätäpysäytyksen jälkeinen tehojen palautus ei saa aiheuttaa liikettä tarraimessa (SFS-EN ISO 10218-1 5.2.2)	V
Tuote ei saa pudota tarraimen voimanlähteen kadotessa odottamatta (ISO 10218-2:2011(E) kappale 5.3.10 A)	V
Tarraimen rakenteessa on huomioitu sähköturvallisuus ts. suora kontakti liittimiin yms. on estetty	V
Kuorman purku on mahdollista tehonsyötön katkettua	V
Piirikortin käsittely ja testaus	
Piirikortin liikuttelu tapahtuu siten, että kortilla oleviin komponentteihin ei kohdistu kuormitusta tai kortti ei muuten vaurioidu	V
Piirikortin käsittelyssä huomioidaan sähköstaattisilta purkauksilta suojautuminen	V
Testausvaiheessa piirikortti on tuettu siten, että neulavoimat eivät taivuta korttia	V
Piirikortti ei pääse liikkumaan testauksessa neuloihin nähden kohtisuorasti	V
Testaus tapahtuu siten, että neulojen ja testipisteiden välinen kontakti tapahtuu $\pm 0,2$ mm:n tarkkuudella (tasossa)	V
Piirikortin kotelointi tapahtuu hallitusti (kortti asettamalla, ei pudottamalla)	V
Kotelon suunnittelussa huomioidaan robotisoidun kokoonpanon vaatimukset ja ratkaisut tehdään prosessin ehdoilla	T
Resurssit ja valmistus	
Projektiin käytettävä budjetti on suuruudeltaan max. 1000 € (pl. työtunnit)	T
Huomioidaan osien valinnassa, että kyseessä on prototyyppi ja periaatetason konseptin testaus	T
Pyritään käyttämään jo olemassa olevia tai helposti saatavilla olevia osia	V
Hyödynnetään käytössä olevia pikavalmistusmahdollisuuksia (3d-tulostus)	V
Kokoonpano ja huollettavuus	
Kokoonpano suoritetaan itse	V
Huoltoa ja asennusvaiheen säätöjä varten kriittisistä osista tehdään helposti vaihdettavia ja niihin pääsy tehdään helpoksi	V

4.4 Abstrahointi

Luvussa 3.1 on esitetty abstrahointiin liittyvät periaatteet ja toiminnot. Abstrahoinnin pohjana käytetään edellisessä työvaiheessa luotua vaatimuslistaa, josta vaiheittain muotoillaan ongelman abstrakti kuvaus.

Poistetaan vaatimuslistasta toiveet ja toissijaiset vaatimukset. Toissijaisina vaatimuksina pidettiin tässä vaiheessa sellaisia ominaisuuksia, jotka sellaisenaan kuuluisivat hyvään suunnittelutapaan tai olisivat jollain tapaa itsestään selvyysiksi. Tuloksena seuraavan lainen lista:

- Tarraimen toimilaitteiden liikkeet ovat kokonaisuudessaan ohjattavissa robotin ohjausrajapinnan kautta
- Tarraimen voimanlähde pneumaattinen (max. 7 bar) tai sähköinen (24 V) tai näiden yhdistelmä
- Tarraimen pystyy käsittelemään mitoiltaan 85x56x1,3 mm piirikorttia (Raspberry Pi 2)
- Robotin hätäpysäytyksen tulee pysäyttää myös tarraimen liike (ISO 10218-2:2011(E) 5.3.8.3)
- Hätäpysäytyksen jälkeinen tehojen palautus ei saa aiheuttaa liikettä tarraimessa (SFS-EN ISO 10218-1 5.2.2)
- Tuote ei saa pudota tarraimen voimanlähteen kadotessa odottamatta (ISO 10218-2:2011(E) kappale 5.3.10 A)
- Tarraimen rakenteessa on huomioitu sähköturvallisuus ts. suora kontakti liittimiin yms. on estetty
- Kuorman purku on mahdollista tehonsyötön katkettua
- Piirikortin liikuttelu tapahtuu siten, että kortilla oleviin komponentteihin ei kohdistu kuormitusta tai kortti ei muuten vaurioidu
- Piirikortin käsittelyssä huomioidaan sähköstaattisilta purkauksilta suojaautuminen
- Testausvaiheessa piirikortti on tuettu siten, että neulavoimat eivät taivuta korttia
- Piirikortti ei pääse liikkumaan testauksessa neuloihin nähden kohtisuorassa tasossa
- Piirikortin kotelointi tapahtuu hallitusti (kortti asettamalla, ei pudottamalla)
- Pyritään käyttämään jo olemassa olevia tai helposti saatavilla olevia osia
- Hyödynnetään käytössä olevia pikavalmistusmahdollisuuksia (3d-tulostus).

Seuraavaksi muutetaan määrälliset vaatimukset laadullisiksi ja yleistetään vaatimuksia. Abstrahointia käytetään pohjana toimintorakenteen luomiselle, joten mielestäni tässä vaiheessa oli aiheellista keskittyä toiminnallisiin vaatimuksiin. Edellisen vaiheen lista muuttui seuraavaan muotoon:

- Tarraimen toimilaitteiden liikkeet ovat kokonaisuudessaan ohjattavissa robotin ohjausrajapinnan kautta
- Tarraimen voimanlähde pneumaattinen tai sähköinen
- Tarraimen soveltuu piirikorttien käsittelyyn
- Tarraimen ei aiheuta vaaratilanteita hätäpysäytyksissä tai muissa erikoistilanteissa
- Tarraimen rakenne on turvallinen
- Piirikortti tai sen komponentit eivät vaurioidu sitä liikuteltaessa
- Piirikortin testaus ei vaurioita korttia

- Piirikortti koteloidaan testauksen päätyttyä
- Suunnittelussa ja valmistuksessa huomioidaan, että kyseessä on prototyyppi.

Viimeisessä vaiheessa muotoillaan edellisten kohtien perusteella neutraali kuvaus tutkimusongelmasta:

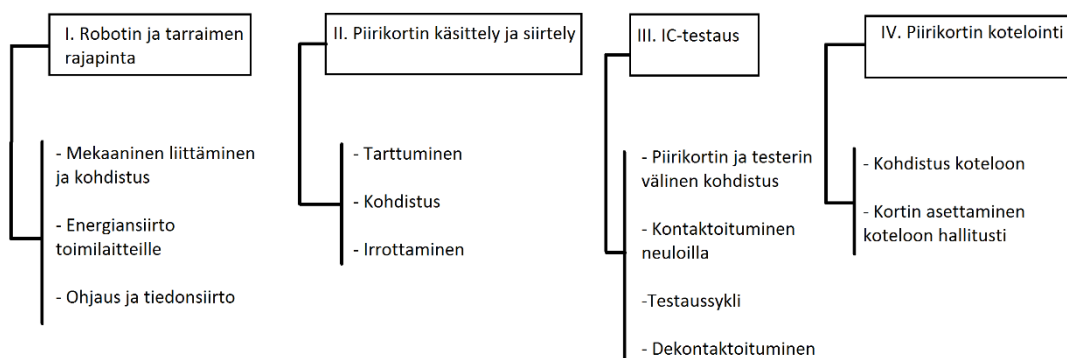
”Piirikortin käsittely, testaus ja kotelointi nivelvarsirobotilla.”

Abstrahoinnin tuloksena saadussa tutkimusongelmassa oleellista on sen sisältämät perustoiminnot, joita voidaan käyttää luodessa toimintorakennetta. Monet ominaisuudet, kuten laitteen turvallisuus ja kustannustehokkuus, sisältyvät mielestäni jo yleisiin suunnittelun peruseriaatteisiin, joten niitä ei ole syytä abstrahoinnin tuloksessa näkyä.

4.5 Toimintorakenne

Tutkimusongelman perusteella voidaan luoda karkea toimintorakenne, joka koostuu abstrahoinnin tuloksena saaduista päätoiminnoista. Päätoiminnot jaetaan pienempiin osatoimintoihin, tarvittaessa mennään jopa perustason fysiikan ilmiöihin. Tarkoituksena on kuitenkin luoda selkeät alirakenteet, joihin voidaan lähteä hakemaan seuraavassa työvaiheessa teknisiä ratkaisuja.

Edellisen vaiheen abstrahointituloksesta luotiin päätason rakenne kuvassa 25 esitetylle toimintorakenteelle.



Kuva 25: Toimintorakenne; päätasot ja alitoiminnot.

Toimintorakenteen perusteella voidaan lähteä kehittämään teknisiä ratkaisuja eri osatoimintojen toteuttamiseen jo tällaisenaan. Toimintorakenteeseen olisi voinut lisätä myös eri osatoimintojen välisiä vuorovaikutussuhteita, mutta sitä ei tässä tilanteessa koettu tarpeelliseksi. Liian yksityiskohtaisen toimintorakenteen todettiin ohjaavan liikaa seuraavan vaiheen valintoja, joten rakenne päätettiin säilyttää melko yksinkertaisena. Monimutkaisissa mekatronisissa kokoonpanoissa on perusteltua esittää eri osatoimintojen sisään- ja ulostuloparametrit ja vuorovaikutukset jo senkin takia, että usein eri moduuleista vastaavat kehitysryhmät toimivat toisistaan erillään.

Monimutkaisten kokoonpanojen hallinta helpottuu hyvin laaditulla toimintorakennekaaviolla.

4.6 Teknisten ratkaisujen hakeminen osatoiminnoille

Teknisiä ratkaisuja haettaessa ensimmäisenä vaiheena oli määrittää, kuinka yksityiskohtaisia ratkaisuja lähdetäisiin hakemaan ja pyrittäisiinkö jokainen alitoiminto käymään läpi tässä vaiheessa. Piti myös keksiä toimiva muoto esittää erilliset ratkaisut tuotekehityskokouksissa, jotta niistä voitaisiin käytännöllisesti muodostaa ja arvioida kokonaisratkaisuja.

Alkuun yritettiin muodostaa osaratkaisut jokaiselle toimintorakenteessa esitetylle alitoiminnoille, mutta lopputulos ei ollut käytännössä toimiva. Ongelma ratkaistiin siirtymällä suurempiin toimintokokonaisuuksiin, jotka muodostuivat huomattavasti helpommin. Teknisiä ratkaisuja etsittiin tutkimalla olemassa olevia järjestelmiä sekä komponenttitoimittajien esitteitä. Myös systemaattisia ongelmanratkaisumenetelmiä käytettiin uusien ratkaisujen löytämiseksi. Tästä esimerkkinä TRIZ-menetelmä (teoriya resheniya izobretatelskikh zadach, vapaasti suomennettuna ”teoria kekseliäästä ongelmanratkaisusta”), jossa ongelma muotoillaan yleiseen muotoon ja käytetään valmiita ratkaisuluetteloita yleisen tason ratkaisun löytämiseksi. Yleisen tason ratkaisu muutetaan juuri kyseiseen tapaukseen sopivaksi. Tämä perustuu olettamukseen siitä, että suurin osa ratkaisuista on jo olemassa ja ne pitää vain muokata tapauskohtaisesti toimiviksi. [Altshuller & al. 2002, s.16]

Osatoimintojen ratkaisut kerättiin morfologiseen laatikkoon, jonka avulla voitaisiin myöhemmin muodostaa kokonaisratkaisuvaihtoehdot. Osatoimintojen suhteen suoritettiin alustavaa karsintaa jo ennen kokonaisuuksien muodostamista. Morfologiseen laatikkoon kerättiin ratkaisuja sekä graafisessa että sanallisessa muodossa. Tuotekehityskokouksessa todettiin, että yksinkertainen graafinen esitysmuoto on havainnollisempi ja yksiselitteisempi kirjalliseen muotoon verrattuna. Liitteessä 1 on lopullinen morfologinen laatikko, jonka perusteella muodostettiin kokonaistoiminnot. Huomionarvoista on se, että jotkin osatoiminnoista oli jo tässä vaiheessa olosuhteiden puolesta määritelty, joten niitä ei sisällytetty laatikkoon. Esimerkiksi robotin ja tarraimen rajapinnaksi määräytyi kaupallinen manuaalinen vaihtolaippa, koska sellainen löytyi robotista valmiiksi asennettuna. Morfologista laatikkoa koottiin sillä periaatteella, että keskitytään päätoimintoihin, jotka määrittävät alitoiminnot ja niiden välisen vuorovaikutuksen.

4.7 Kokonaisratkaisut

Morfologisessa laatikossa esitetyistä osatoiminnoista valittiin muutamia toimiviksi oletettuja kokonaisratkaisuja. Tässä vaiheessa yksityiskohtia ja toimintojen välisiä vuorovaikutuksia ei pohdittu liikaa, vaan haluttiin luoda jotain jonka pohjalta ideoita

voitaisiin työstää eteenpäin ja nähdä niiden heikkoudet ja vahvuudet. Jatkotyöstettäväksi kokonaisratkaisuiksi valittiin seuraavat kombinaatiot (ohessa esitetyt luvut viittaavat morfologisen laatikon ryhmittelyyn).

Vaihtoehto A:

- Alipainetarrain (1.3)
- Ei erillistä kohdistusta (2.1)
- Kiinteät neulat, kontakti robotin avulla (3.2).

Vaihtoehto B:

- Kaupallinen tarttuja (1.1)
- Muotoilu kohdistaa kortin (2.2)
- Kiinteät neulat, kontakti robotin avulla (3.2).

Vaihtoehto C:

- Kaupallinen tarttuja tai lineaarisesti liikkuvat tartuntapinnat (1.1 ja 1.2)
- Muotoilu kohdistaa kortin (2.2)
- Liikkuvat neulat (3.1).

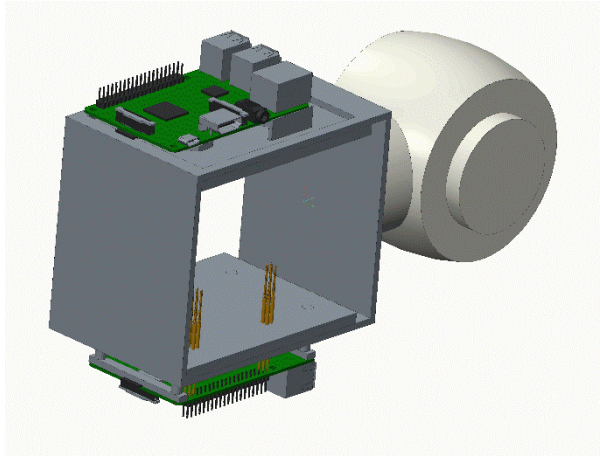
Vaihtoehto D:

- Kaupallinen tarttuja (1.1)
- Muotoilu kohdistaa kortin (2.2)
- Piirikortti liikkuu, kiinteät neulat (3.3).

4.8 Kokonaisratkaisujen arviointi ja valinta

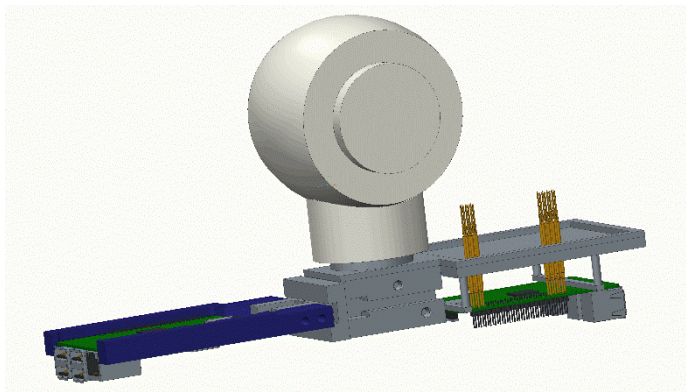
Luvussa 4.7 esitetyistä vaihtoehtoista luotiin karkeat 3D-mallit käyttäen PTC:n Creo Parametric 2.0 mallinnusohjelmaa. Ajatuksena oli saada riittävä yleiskuva jokaisesta vaihtoehdosta arviointia varten ja havaita rakenteista silmiinpistävimmät ongelmat.

Vaihtoehto A (kuvassa 26) oli toteutukseltaan yksinkertainen, vastakkaisille puolille runkoa asetetut kiinteät neulat ja alipainetarrain. Kiinteät neulat vaativat lisäksi myös jonkinlaisen ulkopuolisen testausalustan pitämään piirikorttia paikoillaan ja tukemaan neulavoimia vastaan. Tässä ja tulevilla vaihtoehtoissa kuvissa näkyvä valkoinen lieriömäinen osa on robotin ”ranne”.



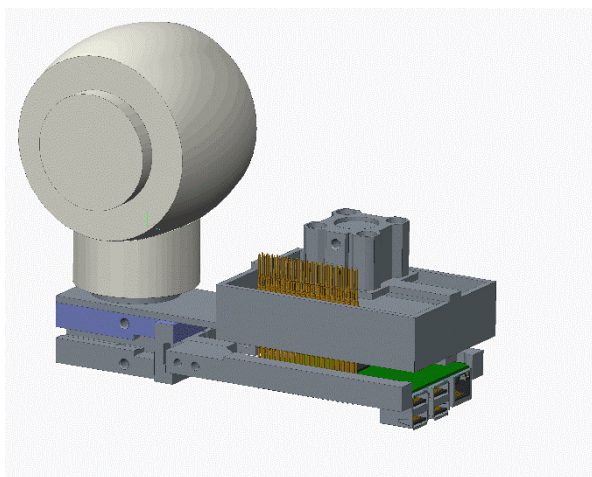
Kuva 26: Vaihtoehto A, alipainetarrain (ylhäällä) ja kiinteät neulat (alhaalla).

Vaihtoehto B (kuvassa 27) koostui myös kiinteistä neuloista, mutta piirilevyä siirreltäisiin pneumaattisella tarraimella. Myös runkoratkaisu on periaatteeltaan erilainen kuin vaihtoehto A:ssa, vaikkakin toteutuksen suhteen molemmat rungot olisivat toimivia kummassakin vaihtoehdossa.



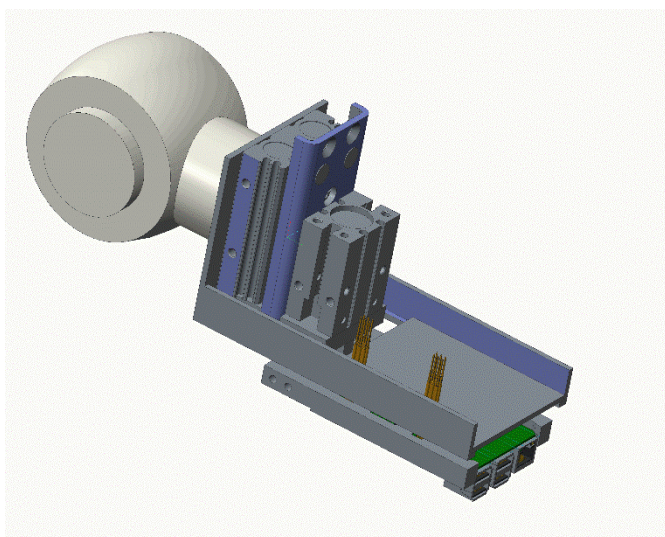
Kuva 27: Vaihtoehto B, kaupallinen tarrain ja kiinteä neulapeti.

Vaihtoehto C (kuvassa 28) koostuu pneumaattisesta tarraimesta ja pneumatiikkasynterin avulla liikkuvasta neulapedistä. Testaus suoritetaan siten, että tarraimen pihdeissä olevaa piirikorttia vasten painetaan testineulat.



Kuva 28: Vaihtoehto C, pneumaattinen tarrain ja liikkuva neulapeti.

Vaihtoehto D (kuvassa 29) koostuu runkoon kiinnitetyistä kiinteistä testineuloista ja lineaaripöytään kiinnitetystä pneumaattisesta tarraimesta, joka liikuttaa piirikortin testineuloja vasten testausvaiheessa.



Kuva 29: Vaihtoehto D, kiinteät testineulat ja pneumaattiseen johdepöytään kiinnitetty tarrain.

Arviointitapaa valitessa yritettiin muodostaa käytännöllinen ja vaivaton tapa löytää kehityskelpoiset kokoonpanot. Luvussa 3.1 arviointitavaksi ehdotettiin sopiviin arviointikriteereihin perustuvaa pisteytysjärjestelmää. Tässä vaiheessa heräsi ajatus siitä, pitääkö arviointikriteerit muodostaa jokaiseen tilanteeseen uudestaan vai olisiko mahdollista löytää yleispätevät arviointikriteerit, joita sopivasti painottamalla voitaisiin käyttää kaikissa tilanteissa. Tästä järjestelmästä tehtiin taulukkolaskentapohjainen demojärjestelmä (kuvassa 30), jossa jokaisen osa-alueen ja yksittäisten arviointikriteerien painotusta pystyttiin liukusäätimillä muuttamaan. Käytännössä ei kuitenkaan voitu löytää yleispäteviä kriteerejä ja painotusjärjestelmä oli liian manipuloitavissa, joten pisteytysjärjestelmästä luovuttiin.

	A	B	C
1		Painoarvo	
2	<u>Vaatimusten vaatimukset/Asiakkaan vaatimukset ja toiveet</u>		10
3	<u>Tuote täyttää pakolliset vaatimukset?</u>		10
4	<u>Tuote täyttää tärkeät toiveet?</u>		8
5	<u>Tuote täyttää ei-tärkeät toiveet?</u>		8
6			
7	<u>Valmistettavuus</u>		10
8	<u>Tuotteessa on vähän osia ts. tuote on yksinkertainen?</u>		7
9	<u>Tuotteessa on paljon valmiina saatavia osia?</u>		8
10	<u>Tuote ei vaadi paljon työstettäviä osia tai erikoistyöstömenetelmiä?</u>		9
11			
12	<u>Käyttöominaisuudet</u>		5
13	<u>Tuote on helppokäyttöinen?</u>		7
14	<u>Tuotteen käyttöliittymä sopii käyttöympäristöön?</u>		8
15	<u>Tuote on ergonominen?</u>		10
16			
17	<u>Asennus- ja huolto-ominaisuudet</u>		7
18	<u>Tuotteen asennus voidaan suorittaa nopeasti?</u>		8
19	<u>Tuotteen käyttöönotto voidaan suorittaa nopeasti?</u>		6
20	<u>Tuote on huoltovapaa?</u>		8
21	<u>Tuotteen purkamisen/osien vaihtaminen on tehty helpoksi?</u>		7
22			
23	<u>Laatu ja toimintavarmuus</u>		9
24	<u>Tuote kestää vaaditun mekaanisen kuormituksen?</u>		10
25	<u>Tuote kestää käyttöympäristöä ts. komponentit on suojattu?</u>		8
26	<u>Tuote on yksinkertainen rakenteeltaan?</u>		8
27			
28	<u>Turvallisuus</u>		4
29	<u>Tuotteella on korkea mekaaninen varmuus?</u>		9
30	<u>Käyttäjän aiheuttamat riskit on minimoitu?</u>		3
31	<u>Tuote täyttää turvallisuusnormit?</u>		2
32	<u>Tuotteen rakenne/toiminta ei aiheuta käyttäjälle vaaraa? (liikkuvat osat tms)</u>		9
33			
34	<u>Kustannukset</u>		9
35	<u>Tuote voidaan toteuttaa budjetin sallimissa rajoissa?</u>		10
36			

Kuva 30: Yleispäteviin arviointikriteereihin ja säädettyihin painotuksiin perustuva arviointijärjestelmä.

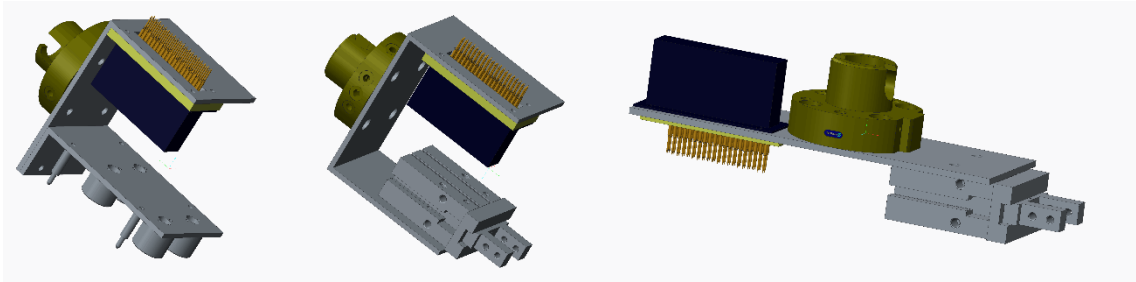
Loppujen lopuksi toimivimmaksi arviointitavaksi todettiin ryhmässä toteutettu arviointi, joka suoritettiin vertailemalla kokoonpanoja toisiinsa täysin omiin insinöörintaitoihin perustuen. Tässä tavoiteltiin samalla myös yrityksen tuotekehityskäytäntöjen muodostamista ja kokoustaessa otettiin tavoitteeksi kokoonpanojen kriittinen tarkastelu ja kyseenalaistava suhtautuminen. Ajatuksena oli, että jokainen kokoonpanossa käytetty tekninen ratkaisu piti perustella.

Lopullista valintaa ei kuitenkaan päädytty vielä tekemään, ainoastaan selkeästi toimimattomat ratkaisut karsittiin ja näin löydettiin kehitykselle oikea suunta. Vaihtoehdot C ja D karsittiin pois, sillä liikkuvat neulat tai liikkuva tarrain ei runkoratkaisuna vaikuttanut käytännölliseltä ja epäiltiin, että muidenkin ominaisuuksien suhteen kohdattaisiin ongelmia, muun muassa ulottuvuus, neulojen kohdistuksen tarkkuus ja rungon tukevuus.

Vaihtoehtoja A ja B pidettiin tässä vaiheessa oikeina kehityssuuntina. Näiden kokoonpanojen etuina olivat niiden rakenteiden yksinkertaisuus ja valintaa tuki myös monissa teollisuuden sovelluksissa käytetyt samantyyppiset ratkaisut. Valmiita ratkaisuja kumpikaan vaihtoehtoista ei vielä ollut ja tätä tilannetta voidaan pitää ensimmäisen iteraatiokierroksen päätöksenä.

Seuraavia iterointikierroksia varten tarkasteltiin näiden kahden rakenteen heikkouksia ja sitä, mitä kokonaisprosessi tarraimelta vaihe vaiheelta vaatisi. Myös vaihtoehtojen A ja B suhteen suoritettiin hieman yhdistelyä, jossa yksittäisiä ominaisuuksia siirreltiin

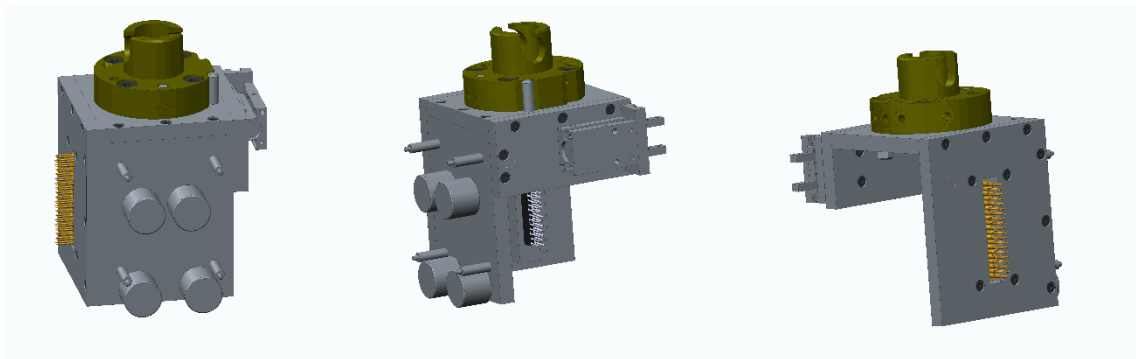
kokoonpanojen välillä. Mallinnus pidettiin tässä vaiheessa edelleen melko karkealla tasolla, kiinnittimet ja muu viimeistely on jätetty kokonaan pois ja on keskitytty ainoastaan toimivaan runkorakenteeseen ja toimilaitteiden sijoitteluun. Kuvasta 31 nähdään miten ideat ovat eläneet iterointikierroksen tuloksena.



Kuva 31: Toisen iterointikierroksen tuloksena saatuja rakenteita.

Tässä vaiheessa ajatus lopullisen rakenteen suhteen alkoi selvitä ja tehtiin myös päätös siitä, että rakenteessa käytettäisiin sekä pneumaattista pihtitarrainta, että alipainetarrainta. Päätökseen oli kaksi syytä: Todettiin, että piirikortin poiminta ja kotelointi on helpointa tehdä eri tekniikoilla ja toisaalta yrityksessä haluttiin saada käytännön tason tietoa kahdesta käytetyimmistä tartuntamenetelmästä.

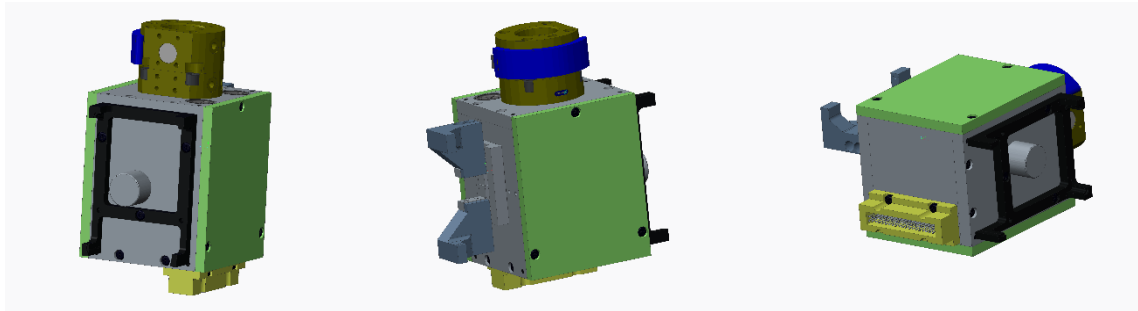
Kolmannella iterointikierroksella tavoitteena oli saada yhdistettyä alipaine- ja pihtitarrain toimivaan runkorakenteeseen. Runkorakenteen suunnittelussa tavoiteltiin yksinkertaista, kestäväää ja komponentteja suojaavaa rakennetta. Ensimmäinen versio näiden muutosten perusteella tehdystä kokoonpanosta on kuvassa 32. Perusideana oli asettaa eri toiminnot eri puolille rakennetta. Alipainetarrain koostuu ohjaustapeista ja alipaineen tuottavista kosketuksettomista tarraimista. Toisella sivulla on pihtitarraimen perusrunko (ilman tartuntapintoja/sormia) ja tarraimen viimeiseen sivuun on asetettu neulapeti.



Kuva 32: Kolmannen iteraatiokierroksen tulos; pihti- ja alipainetarraimen yhdistelmä kuutiomaisessa rungossa.

Mikäli tarkastellaan koko robotin suorittamaa prosessia, oli pihtitarraimella tarkoitus poimia piirikortti paletista ja siirtää testialustalle. Testialustaa vasten piirikortti on tuettuna neulatestauksen ajaksi. Testauksen jälkeen piirikortti poimitaan alipainetarraimella ja asetetaan kokoonpantavaan koteloon.

Kolmannen iteraatiokierroksen jälkeen rakenteeseen ei oltu vielä tyytyväisiä, vaan kotelosta haluttiin suojaavampi ja käytännössä kaikki pneumatiikka- ja sähköliitännät haluttiin kotelon sisään suojaan. Kotelosta päädyttiin neljännellä iteraatiokierroksella tekemään kokonaan umpinainen ”kuutio” ja pihtitarraimen runko sijoitettiin lähes kokonaan kuution sisään. Toimilaitteiden sijoittelua paranneltiin ja suoritettiin alustavaa laskentaa sopivien komponenttien valitsemiseksi. Neljännen iteraatiokierroksen tuloksena päädyttiin kuvan 33 mukaiseen rakenteeseen. Tarkemmin komponenttien valintaa ja laskentaa on käsitelty luvussa viisi.



Kuva 33: Neljännen iteraatiokierroksen rakenne, suljettu kotelo ja uudelleensijoitetut toimilaitteet.

5 Prototyypin suunnittelu ja valmistus

Tässä luvussa käydään läpi prototyypin rakenne ja tekniset ratkaisut ja niiden valinta tarkemmin. Tarkoitus on kuvata kuinka prosessi eteni tietokonemallista valmiiksi prototyyppiä ja millaisia valintoja prosessin aikana tehtiin.

5.1 Yrityksen asettamat tavoitteet ja rajaukset prototyypin suhteen

Kuten jo aikaisemmin todettiin, työn tarkoituksena oli kartuttaa yrityksen osaamista robotiikan, tarraimien ja näissä käytettävän teknologian suhteen. Tämä tavoite osaltaan ohjasi teknisiä valintoja prototyyppiä suunnitellessa.

Prototyypin valmistuksen suhteen tavoitteeksi asetettiin käyttää mahdollisimman paljon jo yritykseltä löytyviä osia ja komponentteja. Kyseessä oli kuitenkin yksittäinen prototyyppi, joten oli perusteltua välttää pienien erien tilaamista. Tällä pyrittiin välttämään pienlaskutuslisät ja muut vastaavat maksut, jotka saattaisivat pahimmillaan moninkertaistaa yksittäisten osien kustannukset.

Yrityksellä oli käytössä myös välineet 3D-tulostukseen (PLA- ja ABS-muovi) (polylaktidi- ja akryylinitriilibutadieenistyreeni-muovi). Tulostettavien osien etuna voidaan pitää myös niiden kevyttä kennomaista rakennetta, joka sinänsä on toivottu ominaisuus tarrainosissa. Tarraimen tulostettavista osista kriittisin oli neulapeti, joka toisaalta vaati riittävää tarkkuutta neulojen sijaintien suhteen ja toisaalta riittävää kestävyyttä neulojen yhteiskuormituksen suhteen.

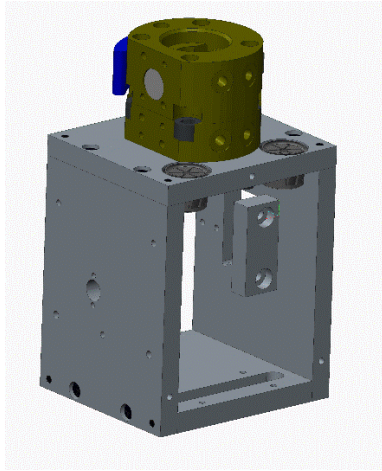
5.2 Prototyypin rakenne

Tässä luvussa käydään läpi tarrainprototyypin rakenne, tekniset ratkaisut sekä niihin liittyvät laskelmat. Tarkoituksena on esittää osien ja osakokonaisuuksien toiminta, rakenne ja materiaalivalinnat. Tarkemmat piirustukset koneistettavista osista löytyy liitteestä 4. Prototyyppi ja sen osat mallinnettiin Creo Parametric 2.0 mallinnusohjelmalla, jolla luotiin myös koneistuspiirustukset.

5.2.1 Runkorakenne

Tarraimen perusrunko muodostuu kuutiomaisesta rakenteesta, johon kaikki tarraimessa olevat toimilaitteet on kiinnitetty. Runkoon on kiinnitetty myös mekaanisena rajapintana robottiin toimiva Schunkin manuaalinen työkalunvaihtolaippa. Kuvassa 34 näkyy

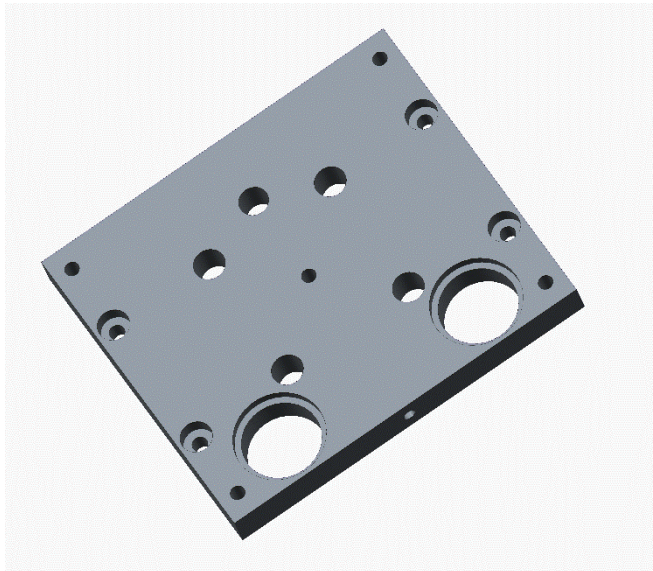
runkorakenne. Runko koostuu kahdeksan millimetriä paksusta alumiinilevystä, johon on koneistamalla valmistettu halutut piirteet.



Kuva 34: Testeritarraimen runko.

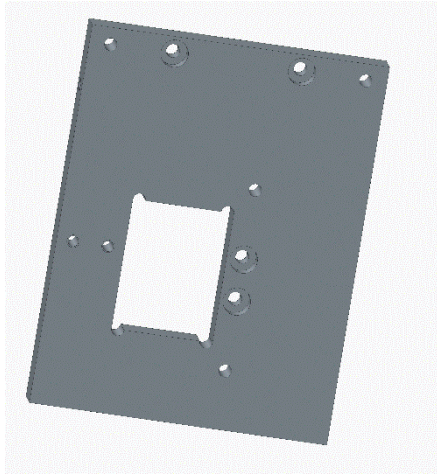
Rungossa käytetyt levyt on kiinnitetty toisiinsa M3-ruuveilla ja kohdistettu kolmen millimetrin lieriösokilla. Tarkemmat koneistukseen liittyvät toleranssit, mitat ja materiaalit löytyvät liitteenä olevista koneistuskuvista.

Rakenteessa olevaan päällimmäiseen levyyn (Base Plate, kuvassa 35) on kiinnitetty työkalunvaihtolaippa. Vaihtolaippa on kohdistettu lieriösokalla ja toleroidulla kohdistuslevyllä. Päällilevyyn on tehty myös pneumatiikan ja sähköjen läpivientejä varten aukot.



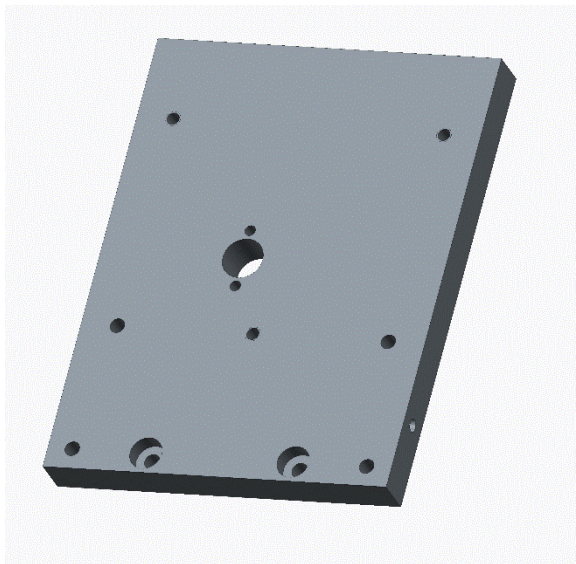
Kuva 35: Base Plate, tarraimen päällimmäinen levy.

Pihtitarraimen puoleiseen sivulevyyn (Gripper Plate, kuvassa 36) on tehty aukko tarraimen upottamista varten. Tarrainta varten sivulevyyn kiinnitetään myös koneistettu tukipala (Support Block), joka kohdistaa ja kiinnittää tarraimen runkorakenteeseen.



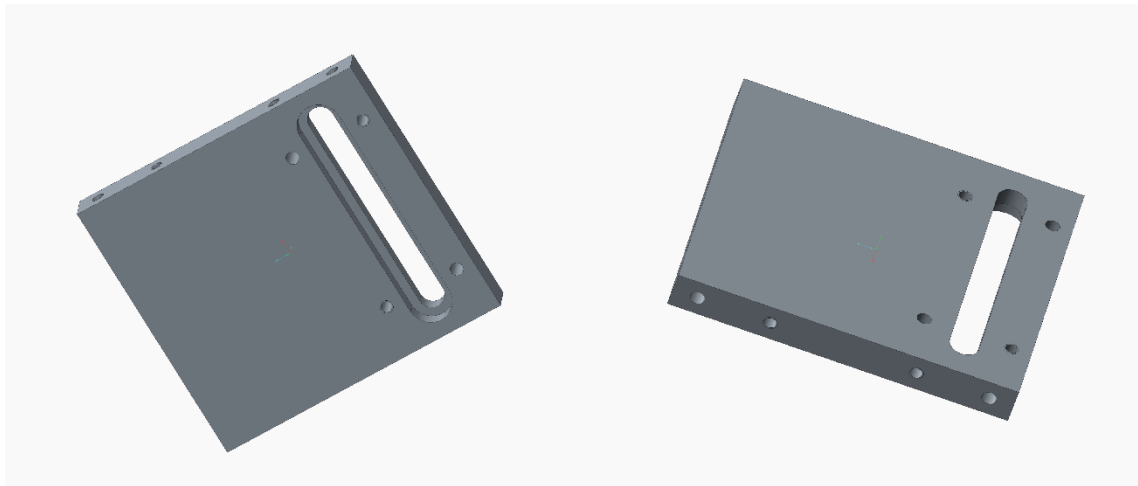
Kuva 36: Pihtitarraimen puoleinen runkolevy, Gripper Plate.

Vastakkaisella puolella on syklonitarrainta varten kiinnityslevy (Cyclone Plate, kuvassa 37). Syklonitarraimelle on levyssä läpivienti ja kiinnitysreiät. Tarraimen lisäksi levyyn kiinnitetään ohjuri, joka estää piirilevyä liikkumasta tarraimen pinnan suunnassa.



Kuva 37: Alipainetarraimen puoleinen runkolevy, Cyclone Plate.

Kuution pohjalevyyn (Probe Plate, kuvassa 38) kiinnitetään tulostettu neulamoduuli. Neulamoduulia varten levyyn on koneistettu aukko sekä kiinnitys- ja kohdistusreiät.



Kuva 38: Tarraimen pohjalevy (Probe Plate), johon kiinnitetään neulamoduuli.

Kaikissa edellä mainituissa osissa pyrittiin huomioimaan se, että koneistus voitaisiin suorittaa mahdollisimman vähillä työkalunvaihdolla ja näin saada kustannuksia pienemmiksi. Myös kaikki koneistettavat piirteet pyrittiin tekemään sellaisiksi, että ne voitaisiin koneistaa yhdeltä puolelta ja kappaleen turhalta kääntelyltä välttyttäisiin kesken koneistuksen. Materiaaliksi valittiin koneistusosiin alumiini EN AW-6082, joka on yleisin koneenrakennuksessa käytetty alumiiniseos. Materiaalivalinnassa pyrittiin huomioimaan materiaalin hyvä saatavuus ja helppo koneistettavuus. Materiaaliin kohdistuva kuormitus ja ympäristöolosuhteet eivät tässä tapauksessa asettaneet juurikaan vaatimuksia materiaalin valinnan suhteen. [Thyssenkrupp 2016]

5.2.2 Pneumatiikka

Tarraimeen päätettiin laittaa sekä pneumaattinen pihtityyppinen tarrain ja alipaineen muodostava kosketukseton syklonitarrain. Pihtitarraimella poimitaan piirikortti paletista ja asetetaan testausalustalle. Testauksen jälkeen piirikortti poimitaan syklonitarraimella ja asetetaan koteloon. Pneumaattiset toimilaitteet kytketään robotissa oleviin venttiileihin.

Pihtitarrainta valitessa piti huomioida tarraimen riittävä puristusvoima, nostettavan kappaleen aiheuttama kuormitus tarraimelle ja riittävä iskupituus. Tarraimen valintaan ja mitoittamiseen käytettiin valmistajan antamia ohjeita. Mitoituksen lähtökohtana toimi lähtöarvojen määrittely. Koska tarraimelta edellytettiin riittävää iskupituutta, lähtökohtaisesti ratkaisuja haettiin SMC:n MHZL2-sarjasta (Paraller Type Air Gripper, Long Stroke).

Lähtöarvot:

piirikortin massa $m = 0.045 \text{ kg}$

käytettävissä oleva paine $p_r = 0.7 \text{ MPa}$

SMC:n ohjeistus määrittää riittävän tartuntavoiman tartuntapinnan ja kortin välisen kitkakertoimen, varmuuskertoimen ja kortin massan avulla seuraavasti (kaava 1):

kitkakerroin $\mu = 0.1$

varmuuskerroin $k_{pt} = 4$

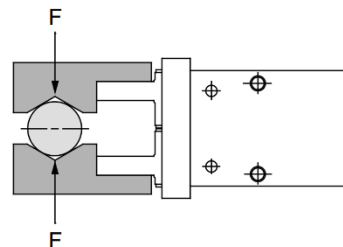
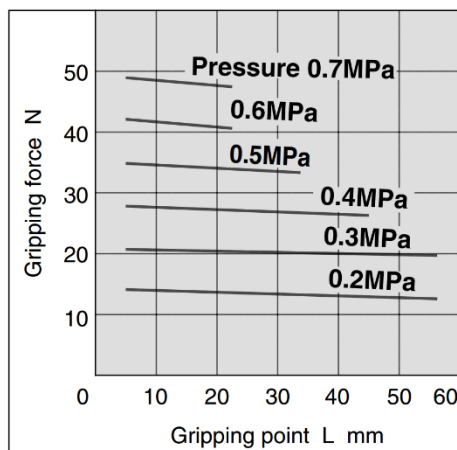
putoamiskiihtyvyys $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

$$\text{tartuntavoima } F_{pt} = \frac{mg}{2\mu} \cdot k_{pt} = 20 \cdot mg = 20 \cdot 0.045 \text{ kg} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 8.829 \text{ N} \quad (1)$$

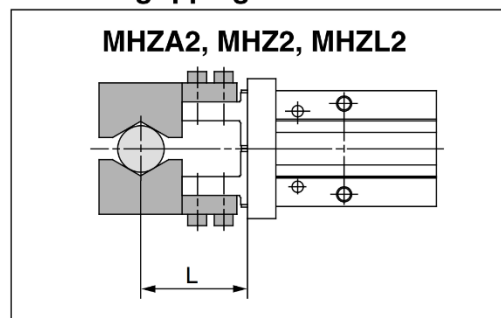
Ohjeessa toisaalta myös pyydetään huomioimaan mahdolliset suuret kiihtyvyydet ja iskumaiset kuormitukset suuremmalla varmuuskertoimella.

Seuraavaksi etsitään sopiva tarrainkoko vertaamalla käytössä olevaa painetta ja tarraainvoimaa. Myös tarraimen tartuntapisteen etäisyys tarraimen rungosta on rajoitettu. Tähän liittyen myös tartuntapintojen ("sormien") muoto ja malli tulisi spesifioida. Tätä käydään läpi tarkemmin myöhemmin. Kuvassa 39 on alustavasti valitun tarraimen (MHZL2-16D) paine-voima-kuvaaja.

MHZ2-16D/MHZL2-16D



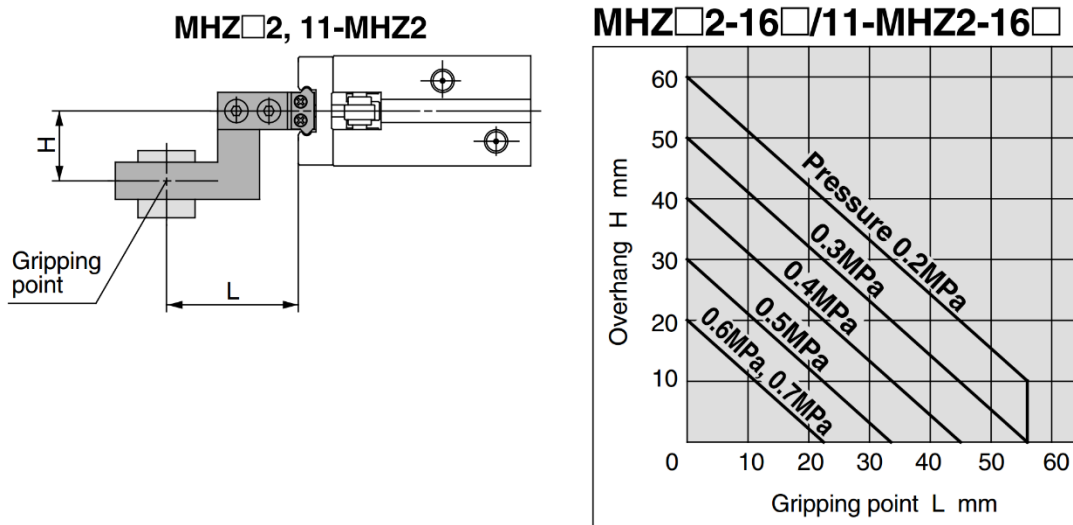
External gripping



Kuva 39: Pihtitarraimen tartuntavoiman ja tartuntaetäisyyden rajoitukset. [SMC 2015, s. 65]

Tarraimen tartuntapisteen etäisyys rungosta on tarkasti rajattu kuvan 40 mukaisesti. Koska 0.7 MPa:n paineella tartuntapisteen tulisi olla todella lähellä runkoa, päädyttiin

painetta pudottamaan 0.5 MPa:in, jotta tartunta olisi geometrian kannalta mahdollista toteuttaa.



Kuva 40: Tartuntapisteen sijainti on käyttöpaineen suhteen rajoitettu. [SMC 2015. s 73]

Jotta saataisiin jonkinlainen käsitys lopullisista kiihtyvyyksistä, joita piirikorttiin kohdistuu, tarkasteltiin robotin manuaalista löytyviä arvoja robotin liikkeistä. Luvussa 2.2.1 esitettyjen tietojen perusteella voidaan saada karkea käsitys kiihtyvyyksistä laskemalla arvo robotin pysäytysajasta ja maksiminopeudesta. Maksimikiihtyvyyttä ei ole suoraan ilmoitettu ja laskemalla saatu arvoa ei voida tässä tapauksessa pitää kovin tarkkana, sillä alkutiedot eivät ole kovinkaan kattavat. Paras arvio tulisi todennäköisesti mittaamalla kiihtyvyyttä anturilla ajon aikana. Robotin kiihtyvyyttä arvioitiin lähtötietojen perusteella seuraavasti:

Robotin ollessa täysin ojentuneena alkuarvot ja pysäytystestin arvot ovat

Robotin kiertymävarren pituus $r = 0.901 \text{ m}$

Pysäytykseen kuluva aika $t = 0.507 \text{ s}$

Perusnivelen kiertymänopeus $v_\alpha = 360^\circ/\text{s}$

Robotin kehänopeus on tällöin kaavan 2 mukaisesti:

$$v_k = \pi \cdot 2r \cdot \frac{v_\alpha}{360^\circ} = \pi \cdot 2 \cdot 0.901 \text{ m} \cdot \frac{360 \frac{^\circ}{\text{s}}}{360^\circ} = 5.661 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (2)$$

Loppunopeus pysäytyksen jälkeen on nolla, joten kiihtyvyys pysäytyksessä on kaavan 3 mukaisesti:

$$a_r = \frac{v_k - 0}{t} = \frac{5.661 \text{ m/s}}{0.507 \text{ s}} = 11.166 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad (3)$$

Tämän arvion tulos ei vaikuta kuormituksen suhteen kovin hälyttävältä, mutta hieman robotin ja tarraimen asennosta riippuen kiihtyvyyksien aiheuttamat voimat saattavat moninkertaistua. Tämän perusteella tarraimeksi valittu MHZL2-16D vaikuttaa sopivalta. Yhtä kokoa pienempi tarrain ei olisi riittänyt puristusvoiman suhteen, mikäli siihen olisi kohdistunut gravitaatio ja robotin liikekiihtyvyydet samanaikaisesti.

Pihtitarrainta varten ei ollut syytä hankkia erillisiä ohjaus- tai säätökomponentteja. Hallinta tapahtui suoraan robotin suuntaventtiileillä ja painesäätö tehtiin asettamalla koko järjestelmän paine haluttuun arvoon. Tarraimen liikenoisuuden säätöä harkittiin, mutta sitä ei nähty tarpeelliseksi.

Pihtitarraimen lisäksi haluttiin käyttää alipaineella toimivaa tarrainta. Alipainetarraimella oli tarkoitus ottaa kontakti piirikortin pintaan, siten että piirikortin reunat jäisivät vapaaksi ja asettaminen kokoonpantavaan koteloon olisi mahdollista. Alipainetarraimen suhteen oli mahdollista valita kahdesta eri vaihtoehdosta: perinteinen imukuppityyppinen ratkaisu ja syklonityyppinen kosketukseton tarrain. Suurimmat erot näiden kahden tekniikan välillä ovat syklonitarraimen ilman kontaktia tapahtuva tartunta ja se, miten alipaine luodaan. Imukuppikatkaisussa järjestelmään pitää lisätä alipaineen luomiseksi ejektori ja syklonitarraimessa alipaine luodaan ilman ejektoria ohjaamalla paineilmaa tiettyyn suuntaan.

Työhön valitussa piirikortissa ei ollut suuria tasaisia pintoja ilman komponentteja ja tämä aiheutti rajoituksia alipainetarraimen valintaan. Toisaalta piti myös muistaa, että kyseessä on robottisovellus, jossa oikeassa tilanteessa tarraimelle syntyisi lukuisia toistoja. Näiden tekijöiden perusteella päädyttiin syklonityyppiseen tarraimeen. Syklonitarrain ei muodostaisi kontaktia piirikortin pintaan, mikä on sinänsä hyvä vaurioiden välttämiseksi. Syklonitarrain ei myöskään vaatinut ejektoria toimiakseen erilaisen toimintaperiaatteensa ansiosta. Syklonitarraimessa alipaine luodaan puhaltamalla, joten mahdollisia epäpuhtauksia ei tällöin todennäköisesti kulkeudu pneumatiikkajärjestelmään. Tarraimen runko on alumiininen, joten verrattuna kumiseen tai muoviseen imukuppiin kuluminen on huomattavasti pienempää. Näiden seikkojen perusteella voidaan syklonitarraimen olettaa olevan huoltovapaampi ja vähemmän vikaherkkä.

Seuraavan työvaiheena oli sopivan kokoisen ja riittävän nostovoiman omaavan syklonitarraimen etsiminen. Valinnassa edettiin valmistajan ohjeiden mukaan ja tarkasteltiin systeemin alkuarvoja ja tartuttavan pinnan ominaisuuksia. Piirikortissa olevat komponentit rajoittivat valinnan jo tässä vaiheessa pienimpään mahdolliseen tarrainkokoon (halkaisija 20 mm).

Kyseisen tarraimen nostovoima laskettiin seuraavasti kaavan 4 mukaan:

piirikortin massa $m = 0.045 \text{ kg}$

paine $p_s = 0.5 \text{ MPa}$

tarraimen ja piirikortin välinen etäisyys $s = 0.5 \text{ mm}$

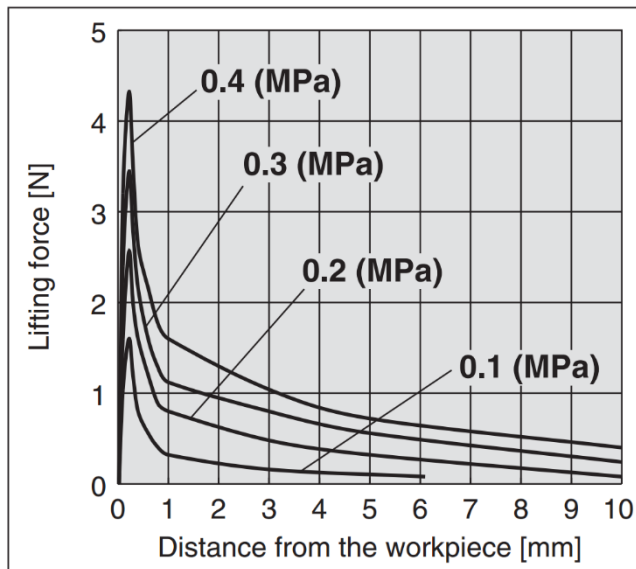
varmuuskerroin $k_{st} = 2$

Piirikortin nostamiseen tarvittava voima varmuuskertoimella 2 on

$$F = m \cdot g \cdot k_{st} = 0.045 \text{ kg} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 2 = 0.883 \text{ N} \quad (4)$$

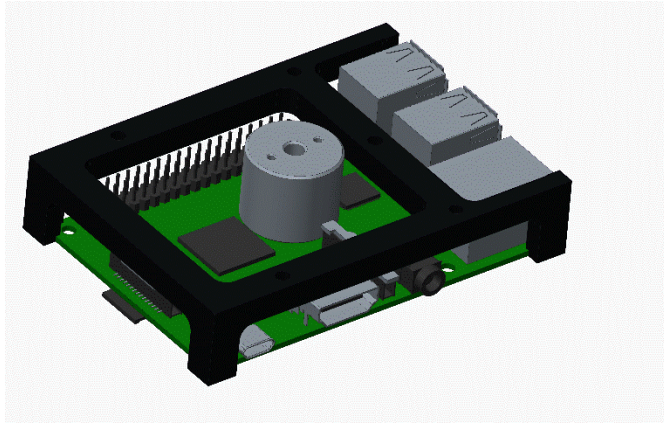
Piirikortin ja tarraimen etäisyyden ja käyttöpaineen funktiona saadaan tarraimen nostovoima kuvasta 41. Paineelle 0.5 MPa ei ole ilmoitettu arvoa, mutta 0.4 MPa:n paineella ja 0.5 mm:n etäisyydellä nostovoima on noin 2.7 N eli noin kolme kertaa vaadittu arvo. Ylimääräinen nostovoima on tässä tapauksessa hyvin toivottu ominaisuus, sillä robotin kiihtyvyydet aiheuttavat lisäkuormitusta. Tarrainta ei ole mahdollista asettaa myöskään piirikortin massakeskipisteeseen, joten tämäkin aiheuttaa ylimääräistä kuormitusta tarraimelle.

Size: Ø20



Kuva 41: Kosketuksettoman tarraimen tartuntavoima paineen ja etäisyyden funktiona. [SMC 2015, s. 11]

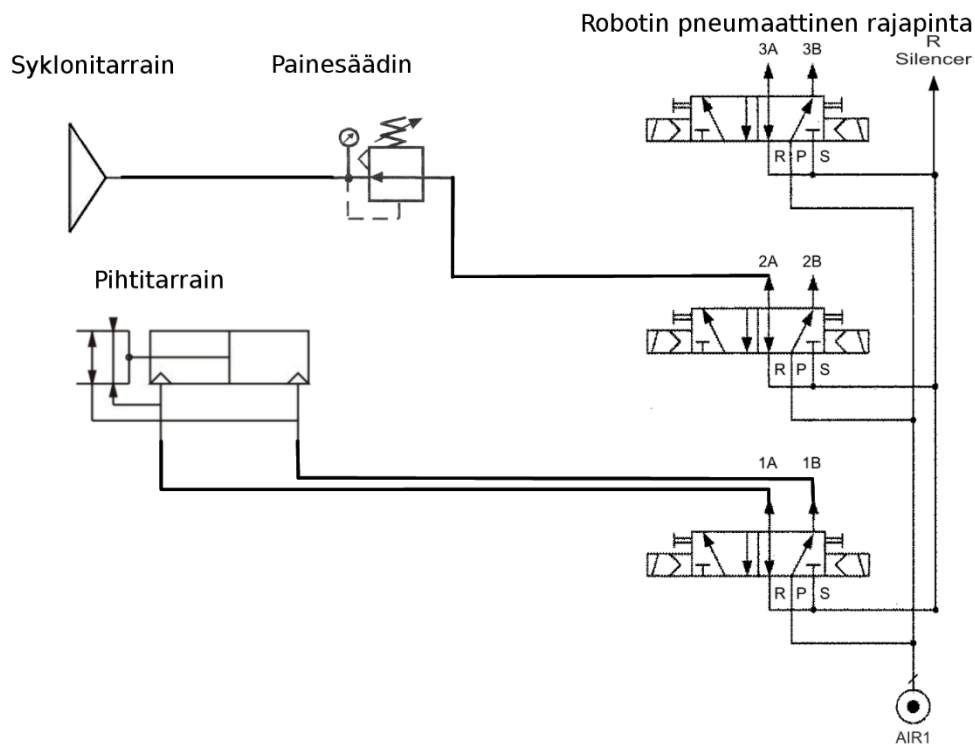
Tarrain on siis kosketukseton ja tämä aiheuttaa sen, että tartuntavoima kohdistuu ainoastaan kortin pintaan kohtisuorasti ja kortti pääsee vapaasti liikkumaan tasossa. Syklonitarraimen ominaisuutena on myös se, että mikäli käytetään yksittäistä tarrainta, syklonivirtaus lähtee pyörittämään käsiteltävää kappaletta. Näistä syistä kappaleen liike sivusuunnassa on estettävä ohjureilla. Ohjuriratkaisu on esitetty kuvassa 42, jossa ohjuri saa kontaktin piirikortin kulmiin.



Kuva 42: Ohjuri estää piirikortin liikkeen tasossa.

Syklonitarraimen valmistajalta saatiin myös suositus, että syklonitarraimen hienosäätöä varten tulisi pneumatiikkajärjestelmään lisätä erillinen paineensäädin tarraimelle. Tästä syystä päädyttiin ratkaisuun, jossa syklonitarraimen pneumatiikkalinjaan lisättiin manuaalisesti säädettävä paineenrajoitin.

Kokonaisuudessaan testertarraimen pneumatiikka on kuvan 43 mukainen. Robotille paineilma tuodaan kompressorin avulla.



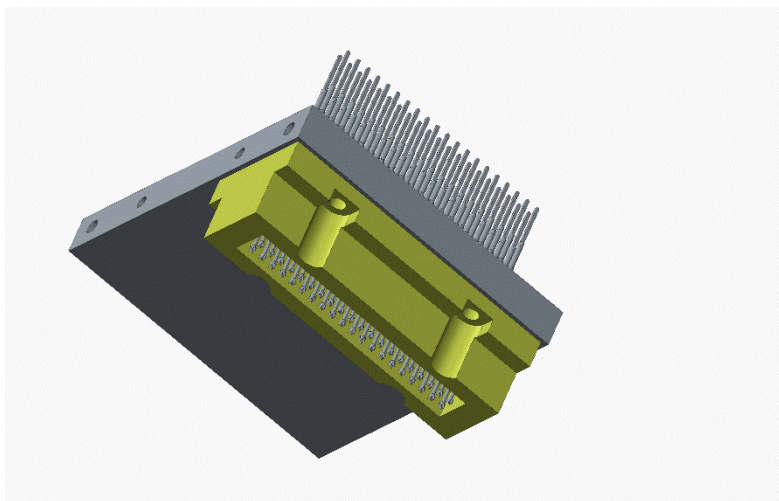
Kuva 43: Testertarraimen pneumatiikkakytkentäkaavio.

5.2.3 IC-testausmekaniikka

Neulatestauksessa piirilevy tuetaan toiselta puolelta ja toiselle puolelle kytkeydytään jousitetuilla neuloilla, jotka painetaan piirikortin pintaa vasten. Perinteisissä neulatestereissä liike tapahtuu nivelmekanismilla, joka varmistaa että neulat kytkeytyvät suoraan piirikortin pintaa vasten.

Tässä työssä päädyttiin ratkaisuun, jossa piirikortti asetetaan testialustalle joka tukee ja pitää piirikortin paikoillaan testauksen ajan. Piirikortin ollessa testialustalla, tuodaan testeritarraimessa olevat testineulat piirikortin pintaan kohtisuorasti. Tässä prototyypissä neuloihin ei ole kytketty varsinaista testauselektroniikkaa, vaan suoritetaan ainoastaan testauksen mekaaniset vaiheet, joista oleellimmat ovat testineulojen tarkka paikoitus ja suora kontakti.

Testineulat kiinnitetään neulaholkkeihin, jotka on painettu neulamoduulissa (Probe Module) oleviin reikiin. Neulamoduulin materiaalin tulee olla sähköä johtamatonta ja riittävän kestävä, sillä neulojen määrä on tyypillisesti kymmeniä tai jopa satoja. Materiaalina perinteisissä neulatestereissä käytetään erilaisia komposiittiseoksia, esimerkiksi CEM:iä (Composite Epoxy Material). Irrotettavan neulamoduulin sijasta testeritarraimessa olisi voitu käyttää koko tarraimen pohjan peittävää CEM-levyä, johon neulaholkit olisi asetettu. Irrotettava moduuli todettiin kuitenkin käytännöllisemmäksi ratkaisuksi huollon kannalta, sillä neuloja voi joutua vaihtamaan. Haluttiin myös testata kuinka 3d-tulostettu kappale toimii neulapetinä. Kuvassa 44 näkyy neulamoduulin rakenne testeritarraimen rungossa. Neulamoduuliin muotoiltiin myös reunat, jotka suojaavat testineuloja ja toisaalta estävät käyttäjää työntämästä sormia suoraan testineuloihin.



Kuva 44: Neulamoduuli (holkkeineen ja testineuloinen) kiinnitettynä pohjalevyyn.

Testineuloja moduuliin tuli yhteensä 40 kappaletta. Koska testineuloilla kontaktoidutaan piirikortissa olevaan piikkirimaan, valittiin neulatyypiksi kruunupäinen neula

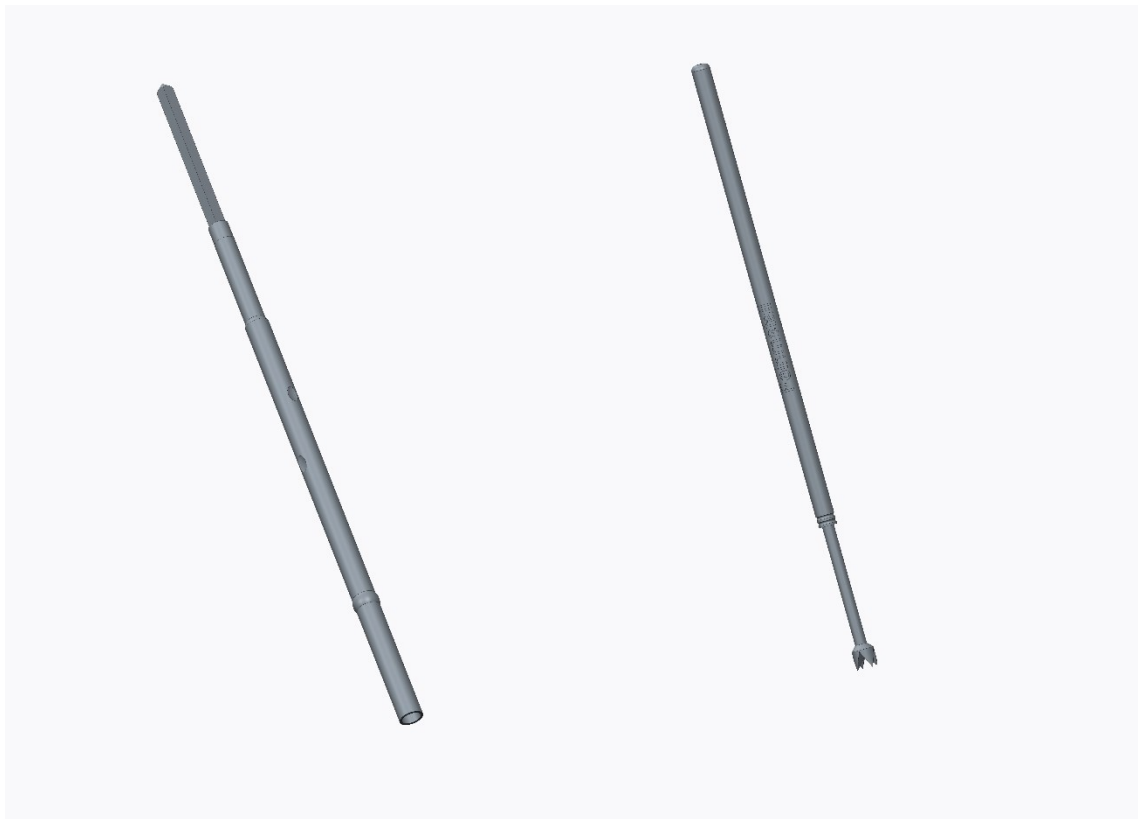
(Feinmetall: F075.14S.120L.180). Neulan kärkityypin lisäksi toinen merkitsevä asia on neulan jousivoima, joka kyseisellä neulalla on 1.8 N neulan ollessa puristettuna oletusiskupituuteen. Kun neuloja on yhteensä 40 kappaletta, saadaan neulamoduuliin ja piirikorttiin kohdistuvaksi kokonaisvoimaksi 72 N kaavan 5 mukaan:

Testineulan jousivoima oletusiskupituudella $F_j = 1.8 \text{ N}$

Testineulojen määrä $n_{tn} = 40$

Neulojen muodostama kokonaisvoima $F_{tn} = n_{tn} \cdot F_j = 40 \cdot 1.8 \text{ N} = 72 \text{ N}$ (5)

Voima kohdistuu suhteellisen pienelle pinta-alalle, joten erityisesti piirikortin tuennasta on huolehdittava testauksen aikana, jottei piirikortti taivu tai vaurioidu. Kuvassa 45 on esitetty työssä käytetty neulaholkki ja testineula.



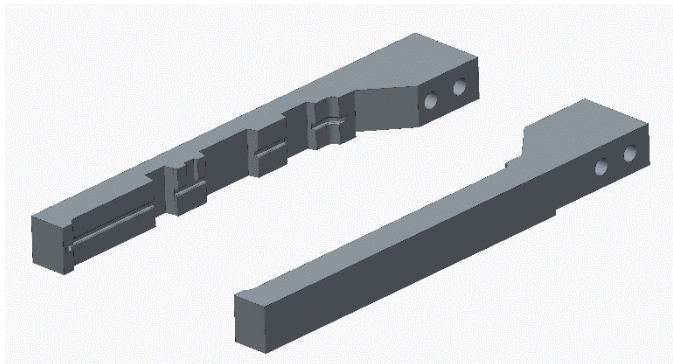
Kuva 45: Neulamoduuliin kiinnitettävä neulaholkki (vas.) ja kruunupäinen jousitettu testineula (oik.).

5.2.4 Tarraimen pihtien muotoilu

Tarrainsovelluksissa on yleistä, että tarraimen runko ostetaan valmiina tuotteena ja yksilöinti käyttötarkoituksen mukaan tapahtuu suunnittelemalla tarraimeen sopivat tartuntapinnat tai ”sormet”. Tässä työssä edettiin vastaavalla tavalla. Tarraimen tartuntapinnat suunniteltiin valmistettaviksi 3d-tulostamalla ja syynä tähän oli se, että ei voitu olla aivan varmoja millainen ratkaisu toimii piirikortin käsittelyyn. Ajatuksena oli

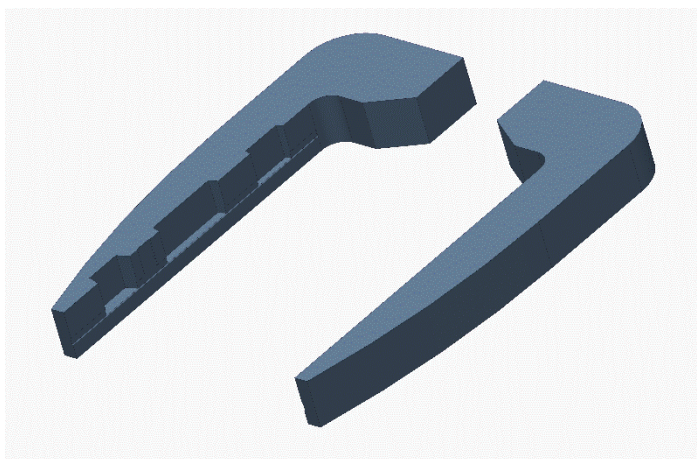
se, että mikäli tartunnassa havaitaan ongelmia, voitaisiin uusi pari tartuntapintoja tulostaa vaivattomasti.

Tarraimen sormia suunnitellessa oli huomioitava sekä piirikortin aiheuttamat vaatimukset, että tarraimen valmistajan asettamat suositukset sormien geometrialle. Piirikorttiin tarttuessa ei kuormitusta voinut kohdistaa siinä oleviin komponentteihin ja tästä syystä tartuntapintaa oli rajallisesti. Ensimmäiset versiot tartuntasormista oli toteutettu kuvan 46 mukaisella ratkaisulla, jossa tartunta tapahtuu koko piirikortin sivun mitalta komponentteja väistäen. Kortin kulmat lukittautuvat sormissa oleviin uriin ja tartunta olisi näin muotosuljettu, jolloin komponentteihin ei kohdistu kuormitusta.



Kuva 46: Tarraimen leukojen ensimmäinen kehitysversio.

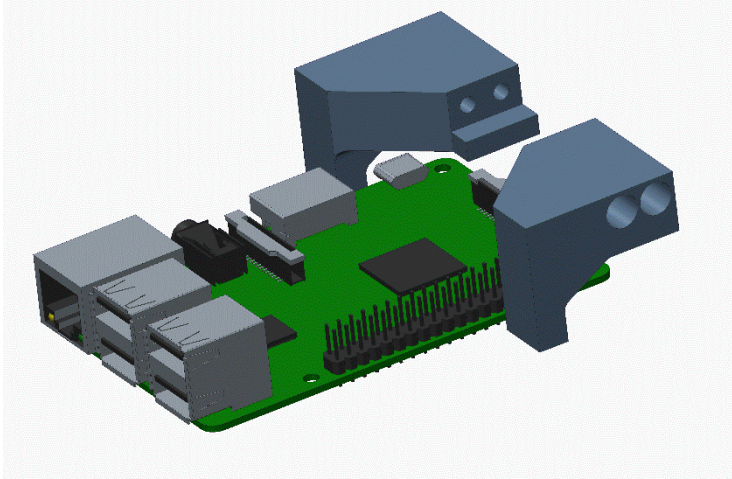
Muotosuljettu tartunta olisi ollut kuitenkin ongelmallinen korttia poimiessa, sillä kortit oli tarkoitus asettaa pystyyn paletissa oleviin telineisiin. Ideaa kehitettiin ja muotosulkeisesta tartunnasta luovuttiin ja sormien muotoilua paranneltiin kompaktimpaan suuntaan (kuvassa 47).



Kuva 47: Tarraimen leuat muutosten jälkeen.

Ratkaisua ei kuitenkaan pidetty käytännöllisenä ja riittävän kompaktina. Myöskään tarraimen vaatimukset tartuntapisteen sijainnin suhteen eivät täyttyneet. Liian kaukana oleva tartuntapiste aiheuttaisi ylimääräistä kuormitusta tarraimelle ja näin lyhentäisi sen

käyttöikä. Uutta ratkaisua lähdettiin hakemaan lyhentämällä tarraimen sormia ja pienentämällä tartuntapinta-alaa. Tartuntapiste siirrettiin eri linjaan tarraimen sormien kiinnityspisteiden kanssa. Lopputuloksena kuvan 48 mukainen ratkaisu, jossa tartunta piirikorttiin on pelkästään kitkan varassa ja tartunta tapahtuu melko pienellä pinta-alalla. Kuvassa ei näy sormissa oleva pieni ura, johon piirikortti asettuu.



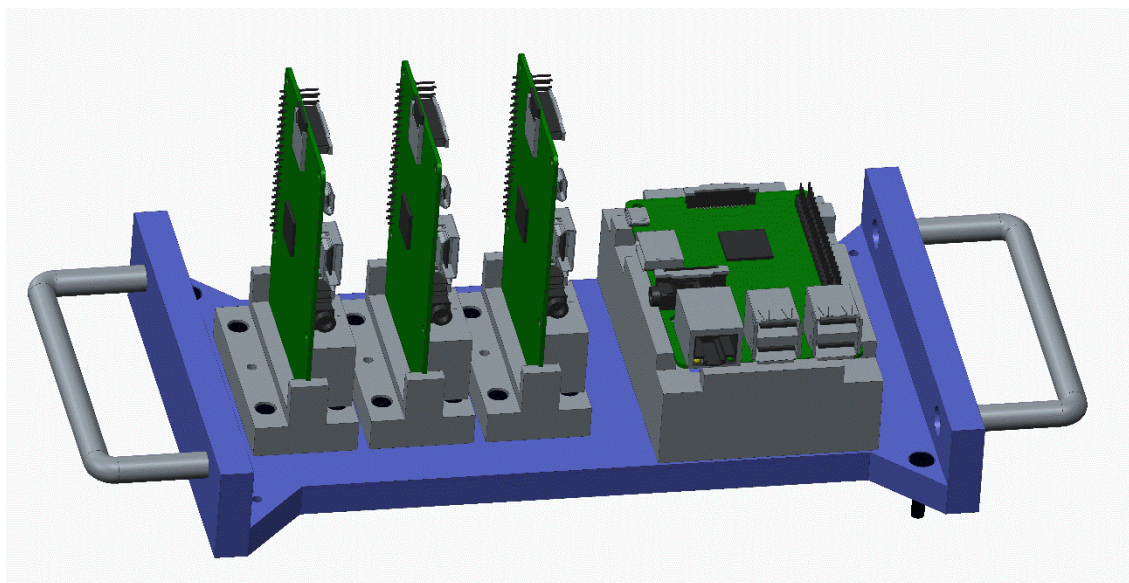
Kuva 48: Tarraimen leukojen viimeinen versio, jossa ero edelliseen on huomattava.

5.2.5 Paletit ja kotelo

Palettien suunnittelussa lähtökohtana oli luoda järjestelmä, joka kuvaisi oikeaa tilannetta esimerkiksi teollisessa ympäristössä. Mutta koska kyseessä on prototyyppi ja resurssit oli kohdistettu pääasiassa testeritarraimeen, tehtiin palettien suunnittelun ja valmistuksen suhteen tiettyjä kompromisseja. Tarkoituksena oli suunnitella sellaiset paletit, joilla voitaisiin testata testeritarraimen toimintaa ja tarkoituksena ei ollut luoda täyden mittakaavan ja volyymin robottisolua. Myöskään palettien kulutuskestävyyden ei tarvinnut vastata oikeaa tilannetta. Edellä mainituista syistä paletit päädyttiin valmistamaan 3d-tulostamalla.

Paletteja tarvittiin kaksi erilaista. Yhdellä paletilla piirikortit tuodaan robotin työalueelle ja samalla paletilla on myös testausalusta. Toisella paletilla on kotelot, joihin piirikortit testauksen jälkeen asetetaan ja lopulta kuljetetaan paletilla pois.

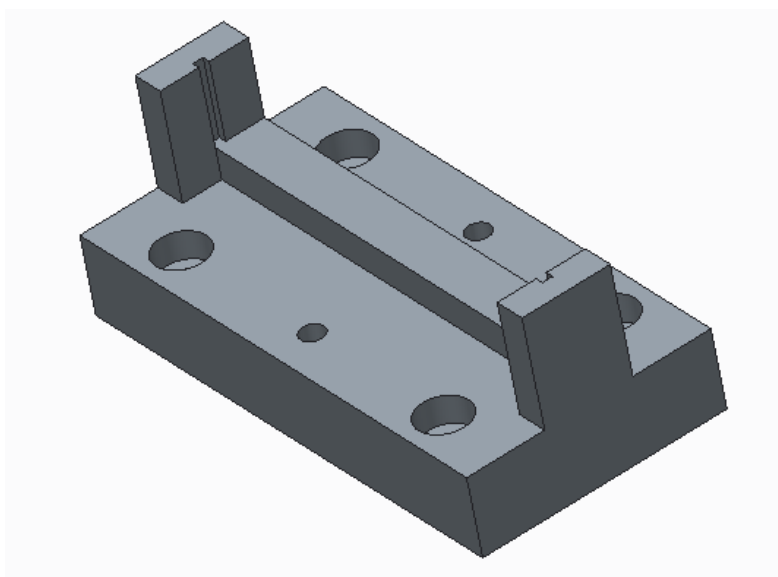
Ensimmäisessä paletissa päädyttiin ratkaisuun, jossa kortit ovat tilansäästämiseksi pystyasennossa. Aikaisemmissa versioissa pohdittiin vaihtoehtoa, jossa kortit olisivat tason suunnassa tuettuina kiinnitysrei'istä. Tasomainen asettelu ei ollut tilankäytöltään järkevää, vaikka piirikortti olisi ollut mahdollisesti helpompi poimia tästä asennosta. Kuvassa 49 näkyy paletin rakenne, joka koostuu pohjalevystä, piirikortin pidikkeistä ja testausalustasta.



Kuva 49: Paletti, jossa on pidikkeet piirikorteille ja testialusta IC-testaukseen.

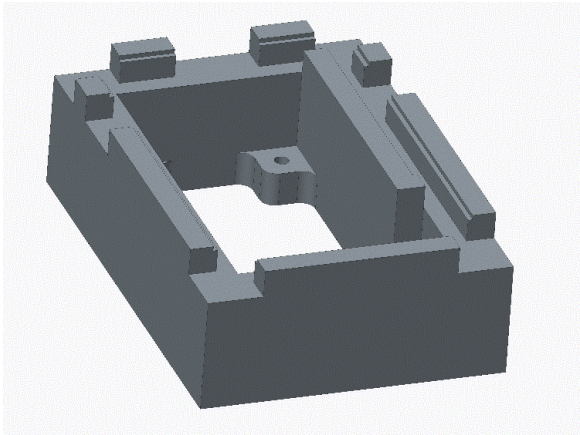
Periaatteessa koko rakenne olisi voitu tulostaa yhtenä kappaleena, mutta tulostusvirheen sattuesssa olisi tulostus pitänyt aloittaa kokonaan alusta. Tulostustiheyttä voitiin myös säädellä ja tässä tilanteessa oli järkevää tulostaa massiivisempi pohjalevy pienemmällä materiaalitiheydellä kuin pidikkeet. Tulostustiheys vaikuttaa suoraan myös tulostusprosessin keston.

Piirikortin pidikkeessä on urat, joihin piirikortti liukuu reunoistaan ja asettuu pidikkeen pohjaa vasten. Pohjassa on väistö piirikortin reunaliittimille, jotta kuormitus kohdistuu pelkästään piirikortin levyosaan. Pidike kiinnitetään pohjalevyyn pulteilla ja kohdistetaan lieriösokilla. Kuvassa 50 on piirikortin pidike.



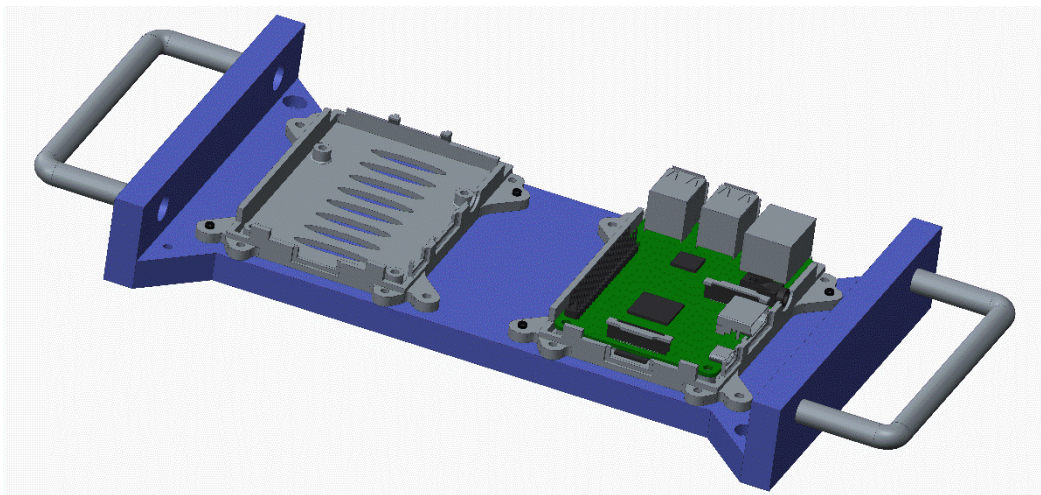
Kuva 50: Piirikortin pidike, jossa piirikortin reunoja vastaavat urat.

Piirikortti asetetaan testausta varten testausalustalle (kuvassa 51), joka kohdistaa ja tukee kortin neulakontaktin aikana. Kohdistus tapahtuu alustan reunoissa olevan upotuksen avulla, joka estää piirikorttia liikkumasta tason suunnassa. Testauksessa piirikortissa olevaan piikkirimaan kohdistuu kohtuullisen suuria voimia ja tästä syystä testausalustassa piikkiriman ympäristö on tuettu. Tämä estää piirikorttia taipumasta ja kippaamasta testin aikana. Testausalustaan on tehty väistöt pihtitarraimen sormia ja kosketuksettoman tarraimen ohjuria varten.



Kuva 51: Testialusta, joka pitää piirikortin paikoillaan testauksen aikana ja tukee neulavoimia vastaan.

Kotelointia varten valmistettiin oma palettinsa (kuvassa 52), johon tuli tässä tapauksessa kotelot kahdelle piirikortille. Piirikortteja oli käytössä kolme ja ajatuksena oli, että yksi korteista on ”viallinen” ja sitä ei testausvaiheen jälkeen koteloida vaan se siirretään sivuun. Kotelo muodostui pohjasta, johon piirikortti asetetaan ja koteloon sopivasta kannesta. Kotelon kantta ei kiinnitetty robotilla, vaan kokoonpano koostui ainoastaan testattujen korttien asettamisesta koteloon.

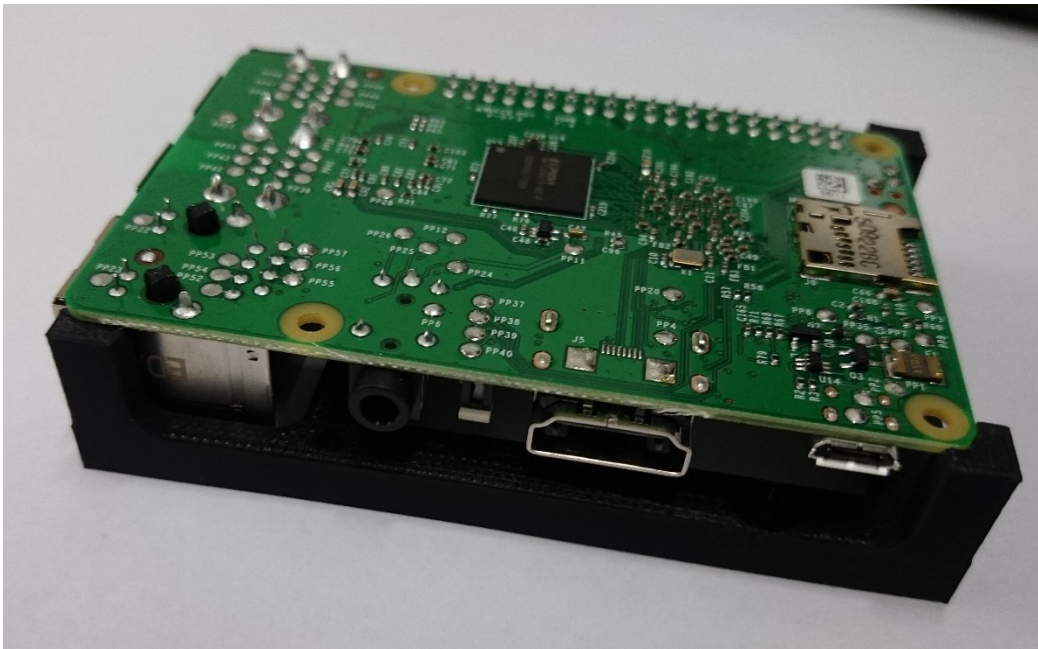


Kuva 52: Paletti, johon sokilla kohdistetut kotelot asetetaan.

5.3 Valmistus

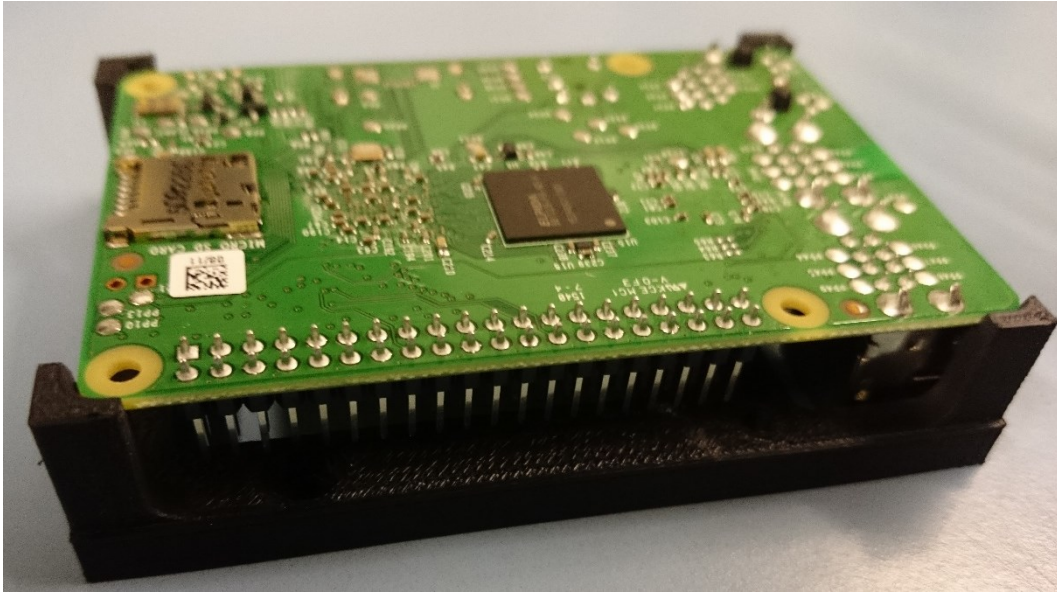
Alumiiniset runko-osat tilattiin koneistettuina liitteenä olevien piirustusten mukaisina ja ne maalattiin ulkopinnoilta. Pneumatiikkaosat tilattiin sellaisenaan suoraan valmistajalta. Loput tarraimessa ja paleteissa olevista muoviosista tulostettiin yrityksen omilla 3d-tulostimilla (MakerBot Replicator 2 (PLA-muovi) ja MakerBot Replicator 2X (ABS-muovi)). Ennen tulostusta osille tehtiin pientä hienosäätöä ja muutamista osista tulostettiin useampia versioita. Yleisesti ottaen tulostus on tarrainten osien valmistukseen hyvin soveltuva menetelmä, sillä osat ovat kennorakenteensa ansiosta kestäviä ja kevyitä.

Piirikortin ohjuriin tehtiin muutoksia, kun ensimmäistä tulostetta tarkasteltaessa huomattiin pientä kutistumista tietokonemalliin verrattuna. Tämä johti siihen, että piirikortti ei mahtunut asettumaan ohjurin syvennykseen (kuvassa 53). Korjaustoimenpiteenä piirikortin syvennykseen lisättiin välystä joka nurkkaan 0.3 mm ja rakennetta viimeisteltiin myös kiinnitysruuvien upotuksien osalta.



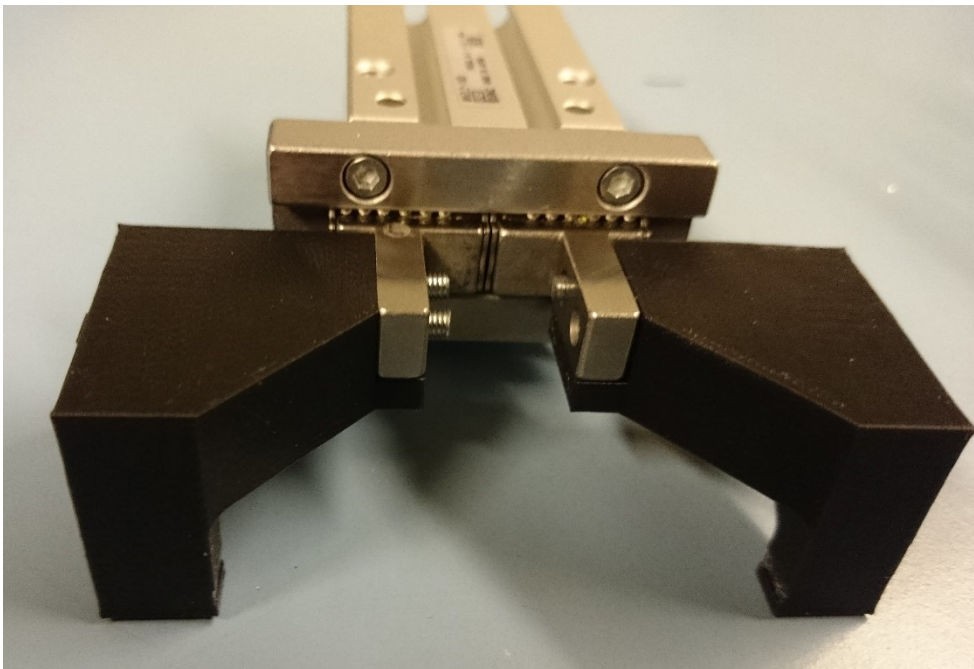
Kuva 53: Ensimmäinen tulostettu versio ohjurista oli kutistumisen takia epäonnistunut.

Kuvassa 54 on korjattu versio piirikortin ohjurista, johon välyksen lisäksi muotoiltiin senkkauks. Senkkauksen tarkoitus on helpottaa piirikortin asettumista ohjurin upotukseen ja vähentää ohjurin vaatimaa asemointitarkkuutta.



Kuva 54: Ohjuriin tehtyjen muutosten jälkeen piirikortti asettui upotukseen hyvin.

Tarraimen leukojen ensimmäisessä versiossa piirikortille oli muotoiltu matala, tasapohjainen ura, mutta leukojen valmistuttua ja alustavien testien perusteella päädyttiin muokkaamaan ura v-malliseksi ja aikaisempaa syvemmäksi. Tarkoituksena oli muotoilulla varmistaa, että piirikortti ei pääse liikkumaan siirtelyn aikana tarraimessa. Kuvassa 55 ensimmäinen versio tarraimen leuoista, joissa matala ura on heikosti havaittavissa.



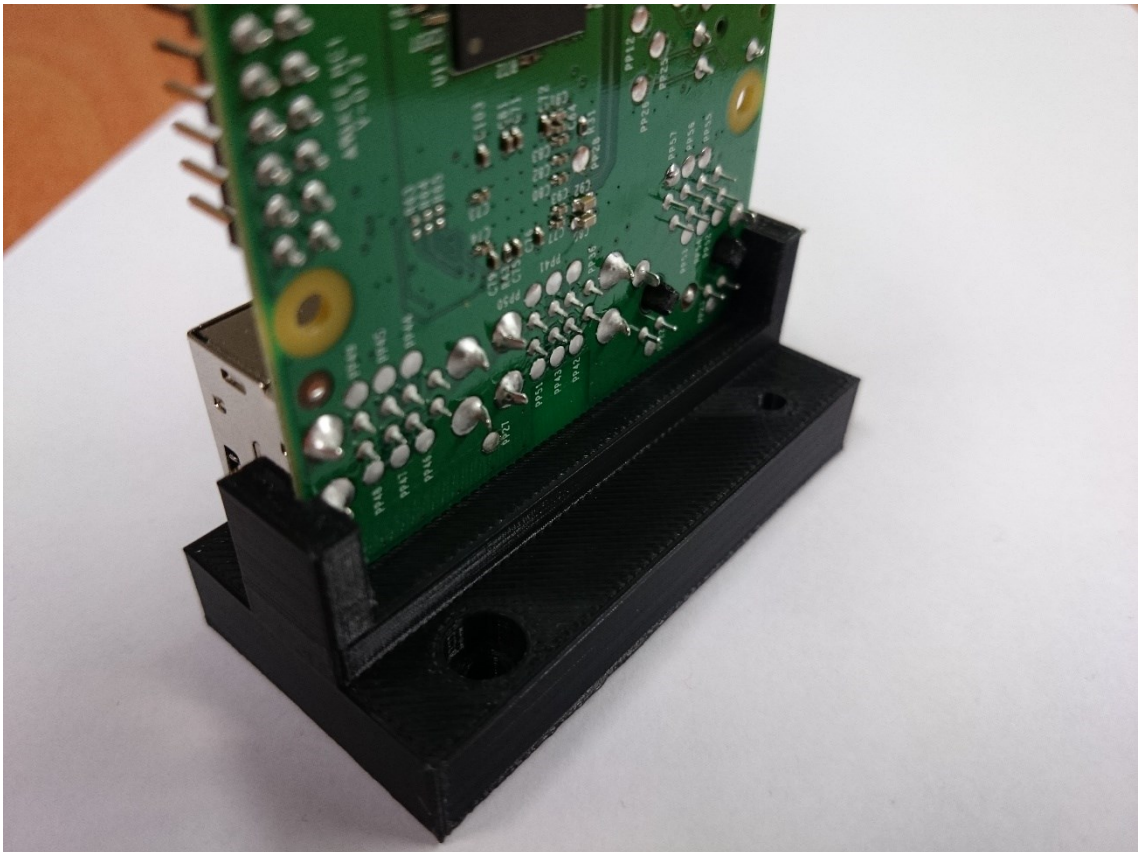
Kuva 55: Ensimmäinen versio tarraimen leuoista.

Kuvassa 56 uusi versio tarraimen leukapaloista joissa syvempi v-ura.



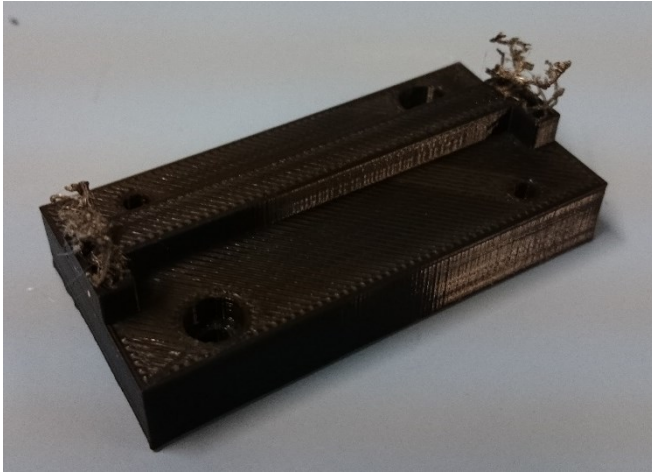
Kuva 56: Piirikortti pysyi v-mallisessa urassa paremmin kuin edellisessä versiossa.

Ohjurin muutosten perusteella myös muihin osiin lisättiin vastaavat välykset. Kuvassa 57 piirikortin pystypidikkeen ensimmäinen versio, joka todettiin sellaisenaan toimivaksi. Tarvittavat välykset ja muutamia muutoksia kiinnitysmekaniikan suhteen tehtiin ennen ensimmäisen version tulostusta.



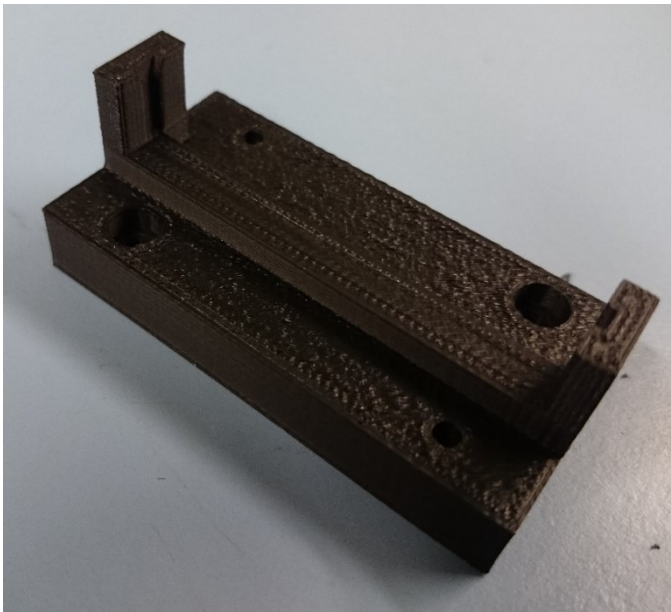
Kuva 57: PLA-muovista tulostettu piirikortin pidike.

Pidikkeitä tarvittiin yhteensä kolme kappaletta ja näiden tulostuksessa ilmeni ongelmia. Tulostuspää tukkeutui tulostuksen loppuvaiheessa toistuvasti ja tästä syystä kelvottomia kappaleita syntyi useita. Kuvassa 58 on esimerkki tyypillisestä virheellisestä kappaleesta.



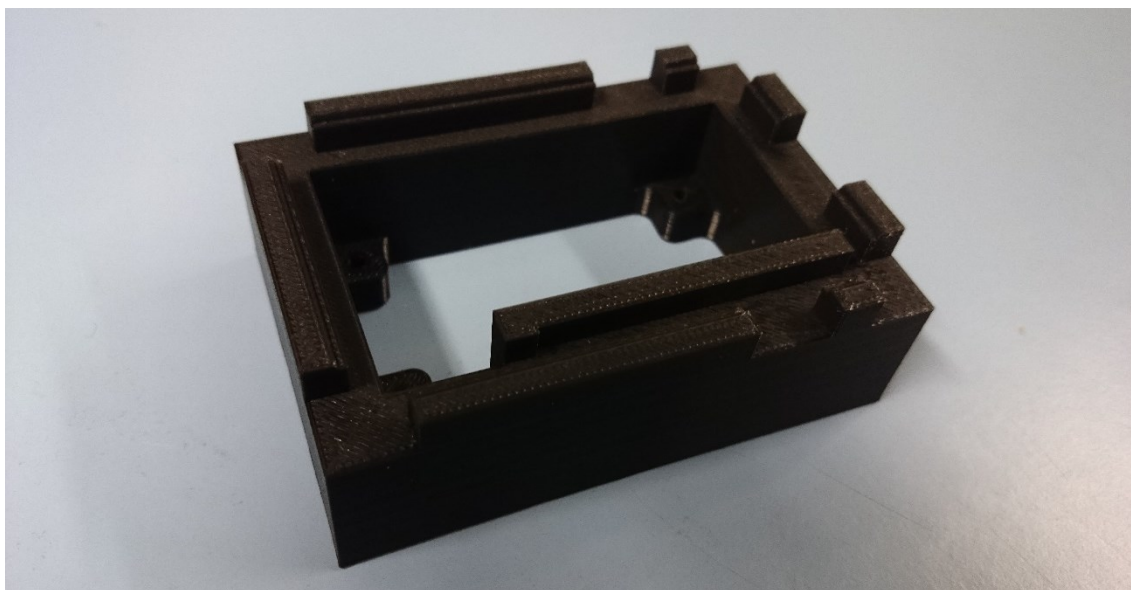
Kuva 58: Tyypillisen tulostusvirheen takia epäonnistunut piirikortin pidike.

Pidikkeen tulostamista päädyttiin kokeilemaan ABS-tulostimella ja samalla pidikkeeseen lisättiin viisteet ohjausurien päihin, jotta tarvittaessa voitaisiin kokeilla piirikortin palauttamista pidikkeeseen robotilla. Kuvassa 59 on viimeisin versio pidikkeestä.



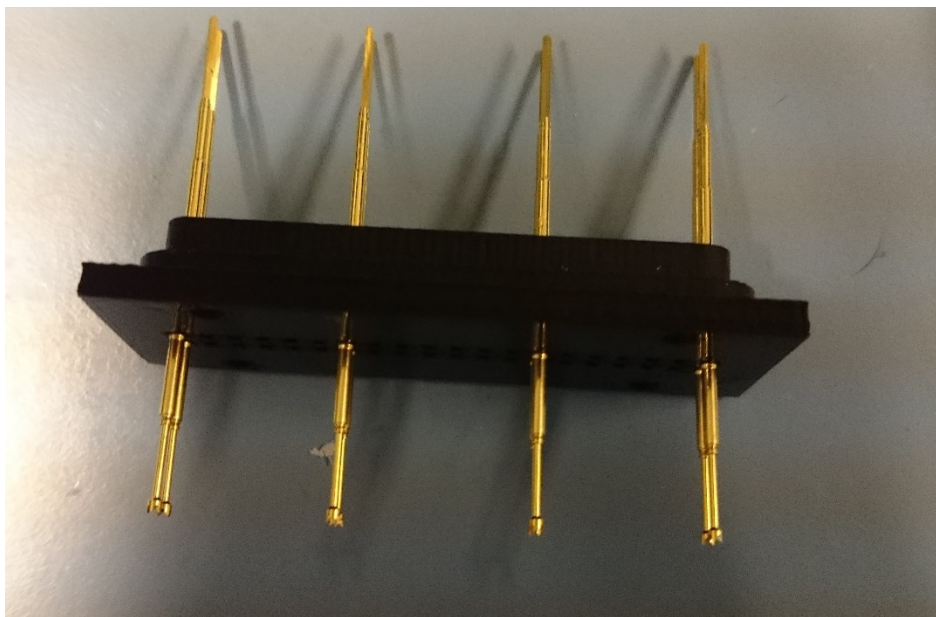
Kuva 59: ABS-muovista tulostettu piirikortin pidike, jonka urissa viisteet.

Testialustaan lisättiin vastaavat välykset kuin ohjurissa, jotta kortti asettuu paikoilleen. Kuvassa 60 on PLA-muovista tulostettu testialusta.



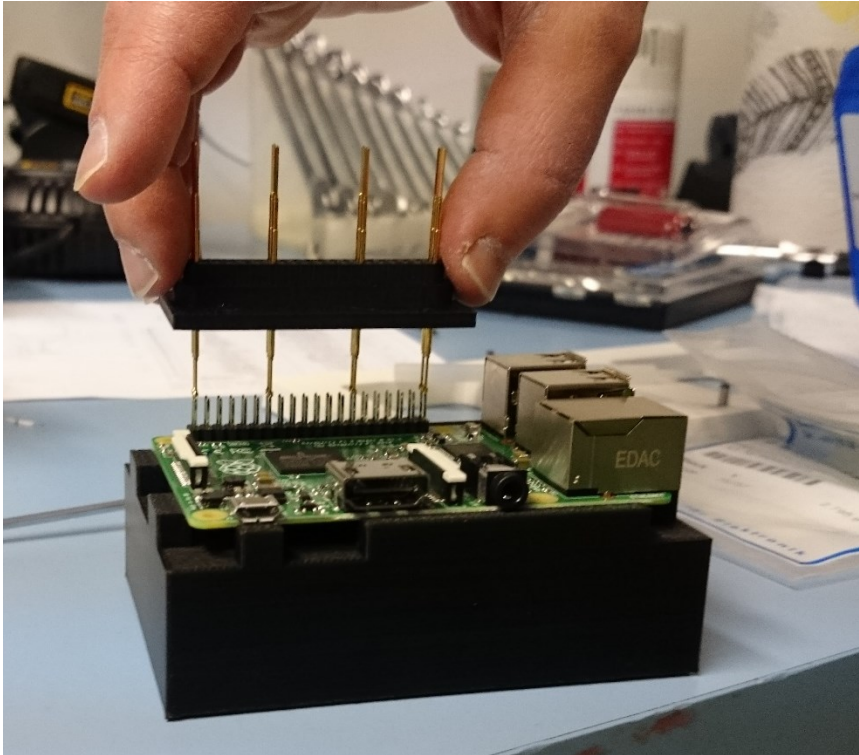
Kuva 60: Testialusta, jonka upotukseen piirikortti asettuu testausvaiheessa.

Neulamoduuli päätettiin jakaa kahteen tulostettavaan osaan, jotta tulostus voitaisiin suorittaa ilman tukimateriaalia (tyhjän päällä olevat pinnat). Käytännössä tämä tapahtui etsimällä moduulista sopiva jakopinta. Neulamoduuli toimi ainoastaan neulaholkkien kiinnitysalustana ja tämän päälle kiinnitettiin neulasuoja. Kuvassa 61 on neulamoduuli holkkeineen ja neuloineen.



Kuva 61: Neulamoduuli, johon kiinnitetty neulaholkit ja testineulat.

Kaikkia neuloja ei kiinnitetty testausvaiheeseen. Neulamoduulin reikiä avarrettiin 1,3 mm poranterällä. Kuvassa 62 on havainnollistettu neulatestauksen periaatetta ja varmistettiin, että neulojen paikat vastaavat piirikortin liittimen nastoja. ABS-muovista tulostamalla valmistettu neulapeti vaikutti potentiaaliselta vaihtoehdolta tavallisesti vastaavissa sovelluksissa käytetylle koneistetulle CEM-materiaalille.



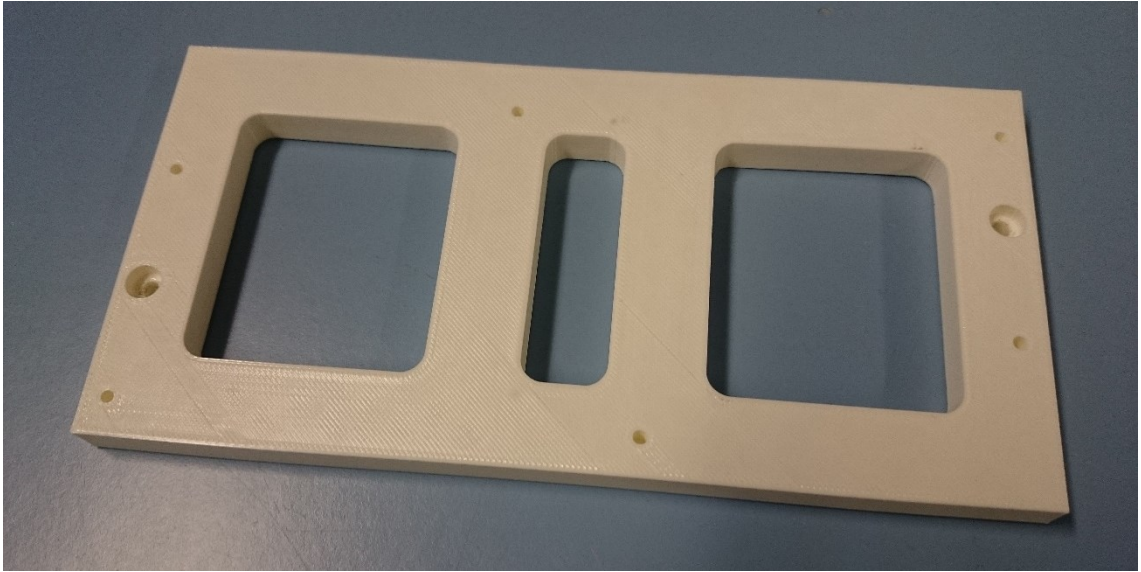
Kuva 62: Neulatestauksen mekaniikan havainnollistaminen.

Neulamoduulia ja sen suojusta varten tulostettiin useampi kappale, koska ABS-tulostimella tapahtuu hetkittäin tulostettavan kappaleen irtoamista ja taipumista tulostuksen aikana. Kuvassa 63 on esimerkki epäonnistuneesta neulasuojasta.

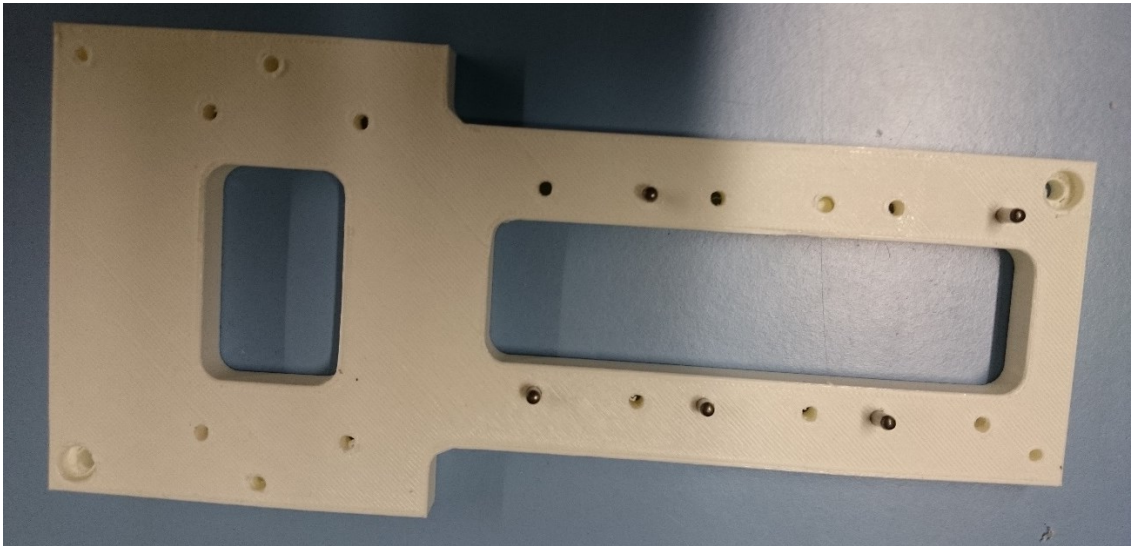


Kuva 63: ABS-muovista tulostettu neulasuoja taipui tulostuksen aikana.

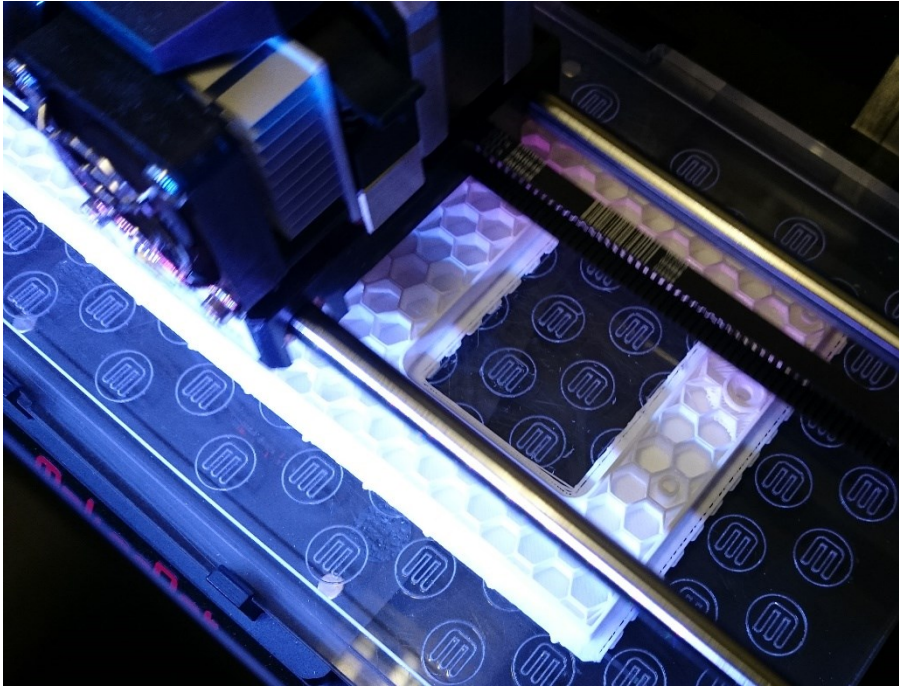
Palettien runkojen ollessa kohtuullisen massiivisia, todettiin että rakennetta on kevennettävä, jotta tulostusajat pysyvät kohtuullisina. Kuvissa 64 ja 65 on esitetty molempien palettien rungot. Paletit tulostettiin myös niin sanotusti pienemmällä täytöllä, jolloin tulosteen sisällä oleva kotelorakenne (kuvassa 66) harvenee ja tulostusprosessi nopeutuu.



Kuva 64: Piirikortin koteloille tarkoitettu PLA-muovinen paletti.

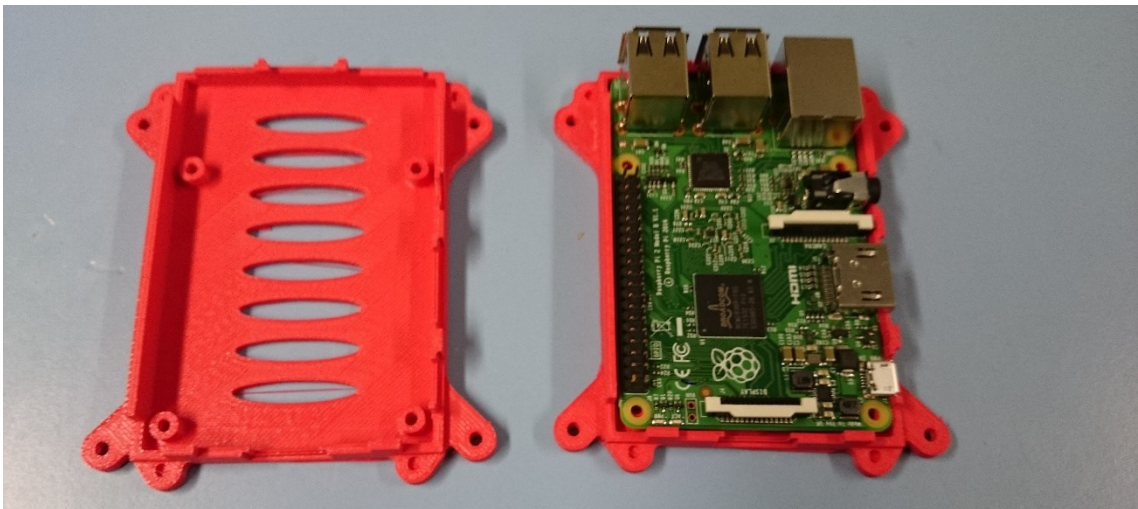


Kuva 65: Piirikortin pidikkeille ja testialustalle tarkoitettu PLA-muovinen paletti.



Kuva 66: Kappaleen tulostusaika vähenee, kun kappaleen kennorakenne tehdään harvempänä.

Konseptiin sisältyvää kokoonpanovaihetta varten tulostettiin myös kotelointia, joihin piirikortti asetetaan. Kuvassa 67 on kotelon pohja.

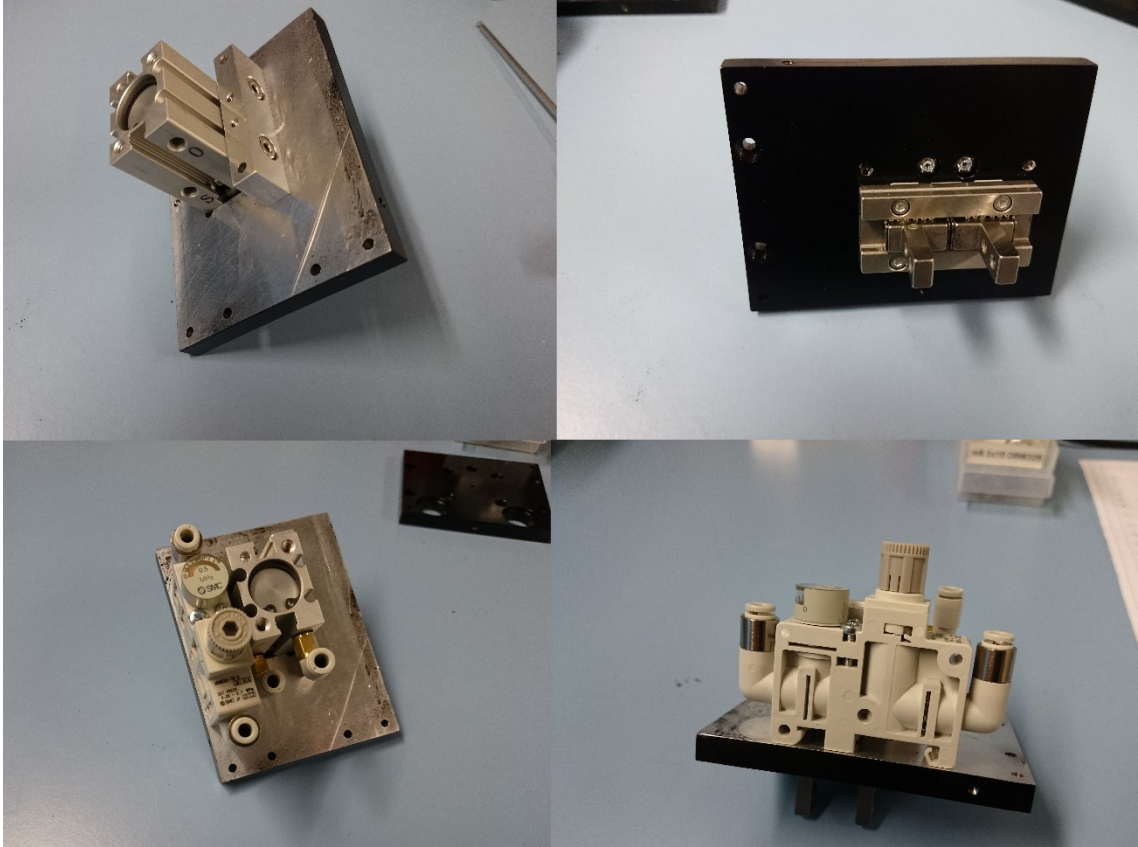


Kuva 67: Piirikortin kotelon pohja

3d-tulostus on prototyyppien rakentamisessa toimiva ja kustannustehokas valmistusmenetelmä, vaikkakin tulostusvirheiden takia valmistusaika saattaa venyä oletettua pidemmäksi. Kennorakenteet ovat myös keveyden kannalta optimaalinen ratkaisu tarrainten osien luomiseen.

5.4 Kokoonpano

Konstruktion kokoonpano oli käyty läpi jo suunnitteluvaiheessa siltä osin, ettei ongelmia tai odottamattomia yllätyksiä syntyisi. Tässä luvussa käydään läpi kokoonpanon eri vaiheet. Kuvassa 68 on esitetty pihtitarraimen puoleisen sivun kokoonpano. Pihtitarrain liitettiin levyyn pienen tukipalan avulla. Samaan levyyn lisättiin myös paineensäädin kosketuksetonta tarrainta varten. Lopuksi lisättiin tarvittavat pneumatiikkaliittimet.



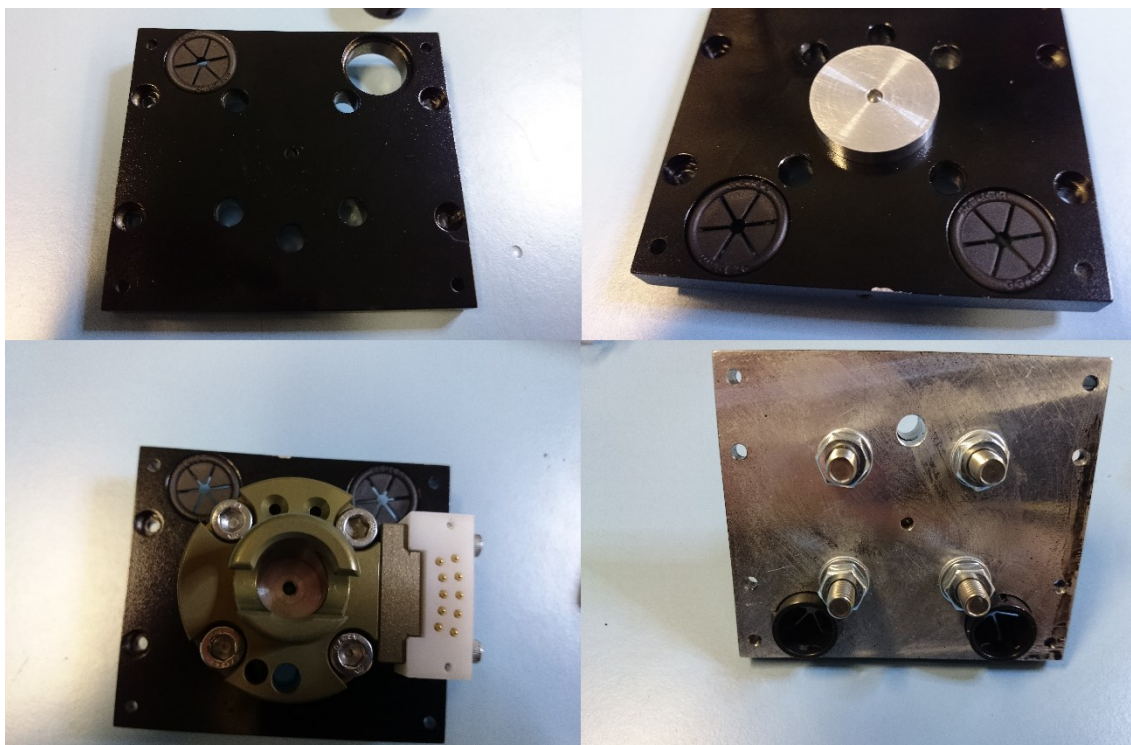
Kuva 68: Pihtitarraimen puoleisen runkolevyn ja komponenttien kokoonpano.

Kuvassa 69 on esitetty kosketuksettoman tarraimen kiinnitys sivulevyyn. Oleellisin asia tässä on, että pneumatiikkaliitin piti kiinnittää ennen kuin tarrain kiinnitettiin ruuveilla. Kuvassa näkyy myös hyvä esimerkki siitä, mihin kriittisessä paikassa tapahtuva työkalun hajoaminen johtaa. Vauriot jäivät tässä tapauksessa lähinnä esteettisiksi epämääräisen reiän muodossa.



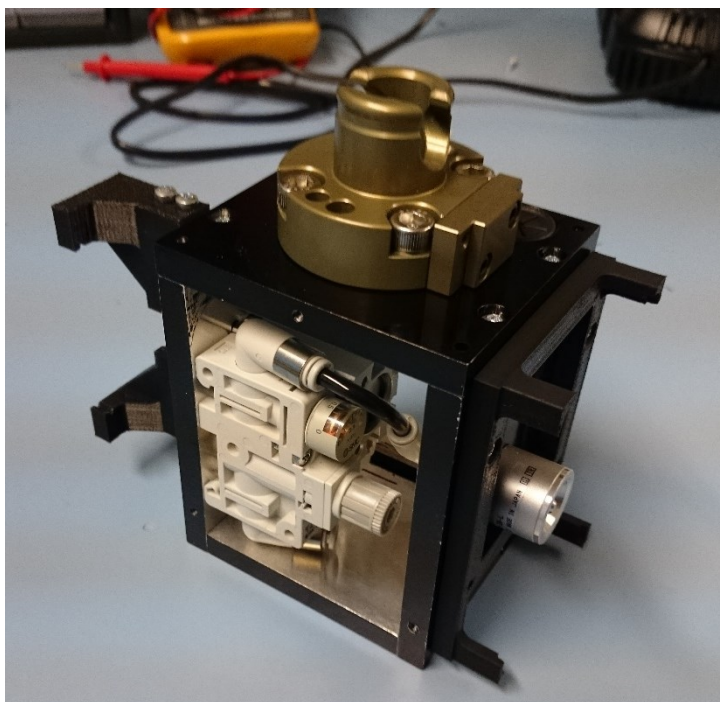
Kuva 69: Kosketuksettoman tarraimen kiinnitys runkoon.

Seuraavana vaiheena oli rungon ”hatun” kokoonpano (kuvassa 70). Runkolevyyn kiinnitettiin muovitulpat pneumatiikan ja sähköjen läpivientejä varten. Kiinnityslaipan kohdistusta varten runkolevyyn kiinnitettiin sokalla pyöreä toleroitu laatta.



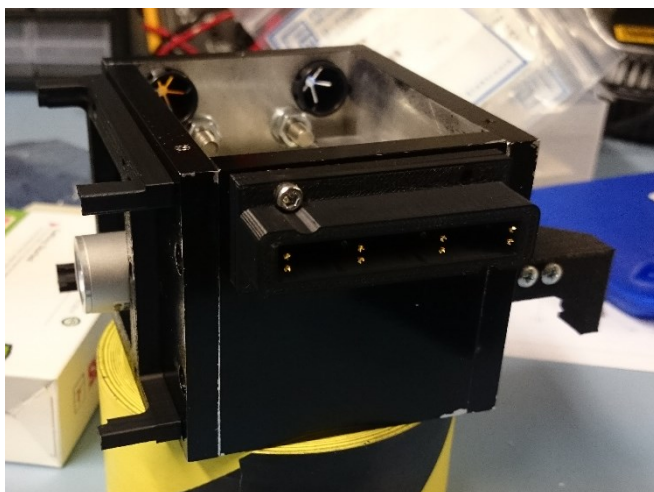
Kuva 70: Runkolevyyn kiinnitetään läpiviennit, kohdistuslevy ja kiinnityslaippa robottia varten.

Seuraavana vaiheena oli rungon kasaaminen ja puuttuvien osien (neulamoduuli, neulasuoja, tartuntaleuat, ohjuri ja pneumatiikkaletkut) kiinnittäminen runkoon. Kuvassa 71 on runkorakenne ennen neulamoduulin lisäystä.



Kuva 71: Runkolevyt kiinnitettiin toisiinsa ruuveilla ja osat kohdistettiin sokilla.

Kuvassa 72 on valmis kokoonpano. Suojalevyt sivuista jätettiin tässä vaiheessa vielä pois, sillä ne eivät testeritarraimen toiminnan kannalta olleet olennaisia ja testivaiheen säätämistä varten piti säilyttää pääsy laitteen sisäosiin.



Kuva 72: Valmiin testeritarraimen pohja, jossa neulamoduuli asennettuna.

Palettien kokoonpano tapahtui kiinnittämällä paletin osat ruuveilla palettipohjaan. Osat kohdistettiin sokkien avulla. Palettipohjat kiinnitettiin liimapuulevyyn ruuvien ja sokkien avulla. Näin saatiin helposti asennettava testialusta robottisoluun. Kuvassa 73 on valmis testialusta paletteineen.



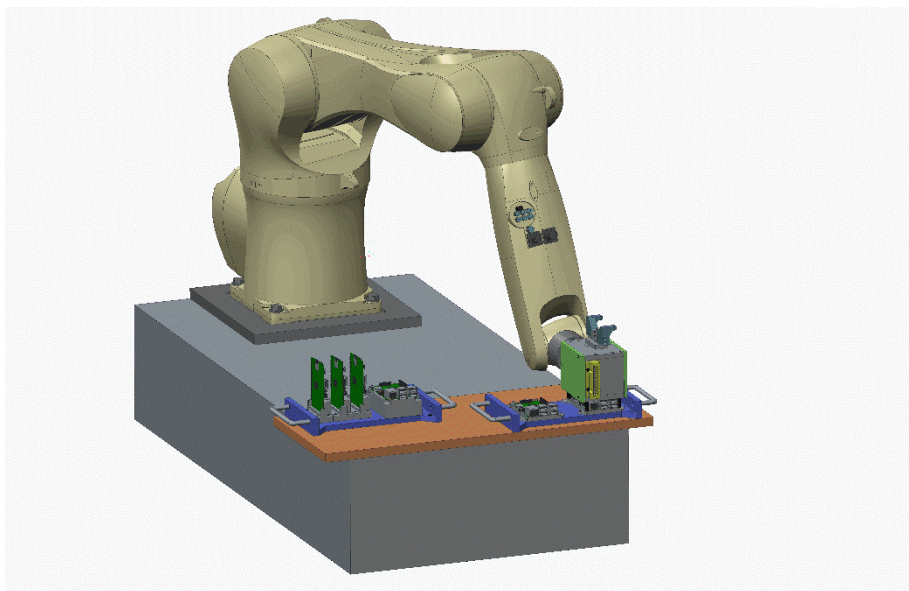
Kuva 73: Liimapuulevy, jossa molemmat paletit kiinnitettyinä ruuveilla ja iskumuttereilla.

6 Robotisoidun tuotantosolun käyttöönotto

Tässä luvussa käsitellään testeritarraimen kokoonpanon jälkeisiä työvaiheita, jotka päättyvät robottisolulla suoritettavaan kokonaiseen työsykliin. Ensin luodaan yleinen silmäys solun kokoonpanoon ja siihen liittyvien oheislaitteiden asentamiseen. Asennusvaiheen jälkeen suoritetaan yksittäisille toiminnoille testit ja tarvittaessa säädetään testeritarrainta tai sen osia. Kun yksittäiset toiminnot kyetään suorittamaan hallitusti, voidaan siirtyä lopullisen työsyklin ohjelmointiin.

6.1 Solun layout

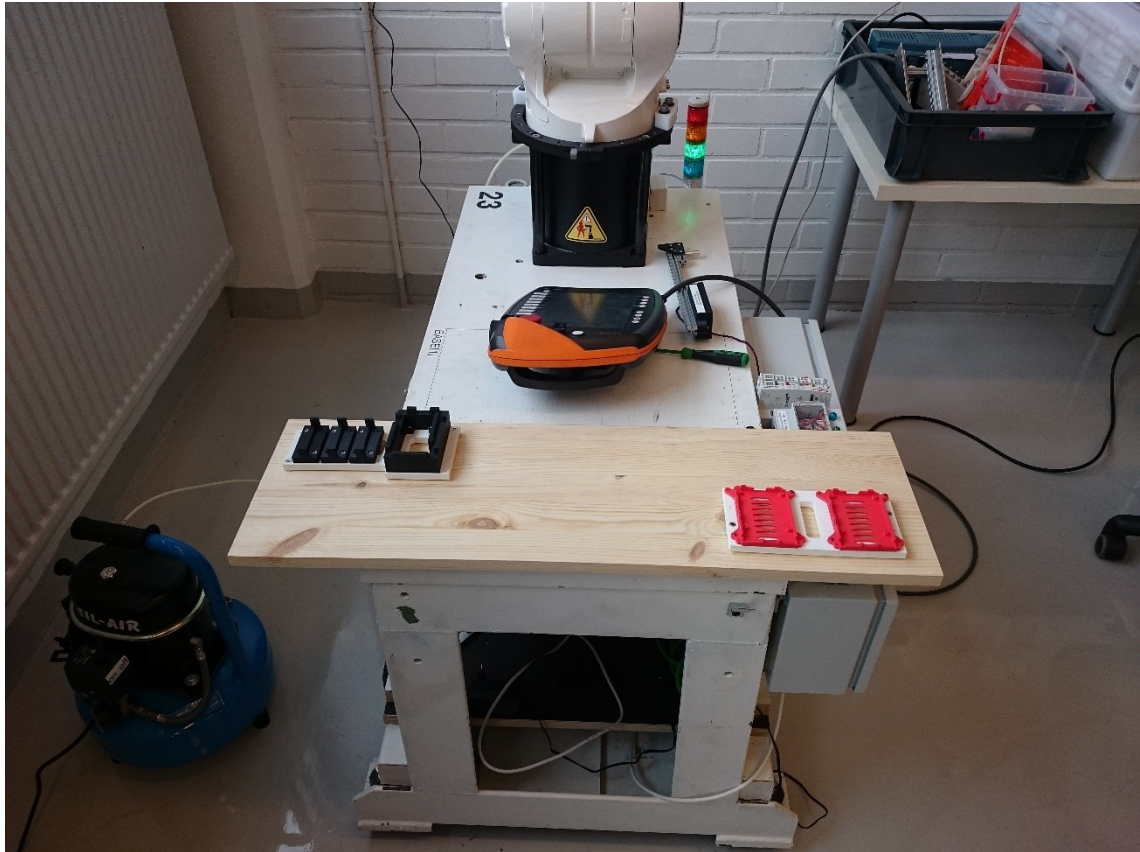
Mikäli kyseessä olisi todellinen teollisuusympäristöön asetettava robottisolu, tulisi sen sijainti ja materiaalivirtojen reitit huomioida solun suunnittelussa. Solun sisällä olevien laitteiden ja osien sijoittelu määräytyi tässä tapauksessa robotin ja testeritarraimen fyysisen ulottuvuuden perusteella. Testeritarrainta ja paletteja suunnitellessa huomioitiin se, ettei testeritarrain missään työvaiheessa törmää paletteihin tai siinä oleviin tuotteisiin. Alustavan palettien ja tarraimen välisen törmäystarkastelun jälkeen tarkasteltiin koko robottisolua. Käytännössä tämä toteutettiin ottamalla kyseisen robotin 3d-malli suunnitteluohjelmaan ja lisäämällä siihen robotin nivelten liikkeitä ja niihin liittyvät rajoitukset. Tällä tavoin varmistettiin, ettei missään asennossa aiheudu törmäyksiä tarraimen, alustan tai robotin rungon välillä. Koska robotin nivelten liike oli rajattu todellisuutta vastaavaksi, päästiin tarkastamaan myös se, että robotin ulottuvuuden suhteen ei synny ongelmia. Tämän perusteella saatiin palettien sijainti alustalla optimoitua. Kuvassa 74 on esitetty yhden työvaiheen törmäystarkastelussa käytetty malli.



Kuva 74: 3d-malli, jolla suoritettiin eri työvaiheiden törmäystarkastelu

6.2 Asennus robottisoluun

Asennus aloitettiin kiinnittämällä testilauta robotin työalueelle. Kiinnitys tapahtui tässä tilanteessa kaksipuolisen teipin avulla. Testilaudan sijainti valittiin etukäteen 3d-mallilla tapahtuneen arvion perusteella siten, että robotin nivelten liikealueita pystyttäisiin hyödyntämään tehokkaasti ja ongelmia nivelkulmien suhteen ei syntyisi. Kuvassa 75 testilauta on asetettuna robotin työalueelle.



Kuva 75: Testilaudan sijainti robotin työalueella.

Testilautaan merkittiin myös kohdistuspiste (kuvassa 76 laudan vasemmassa ylänurkassa), jonka suhteen robotin käyttämät muut koordinaattipisteet määriteltiin. Ajatuksena nollapisteen käyttämisessä on se, että mikäli testilauta irrotetaan ja kiinnitetään uudelleen hieman eri sijaintiin, robotti osaa nollapisteen asettamisen jälkeen suhteuttaa muut työpisteet automaattisesti. Kohdistus tapahtui ajamalla kuvassa 76 näkyvällä kohdistustyökalulla nollapisteeseen, siitä lähtevään x-akseliin ja johonkin xy-tason pisteeseen.



Kuva 76: Laudan vasemmassa yläkulmassa näkyvä kohdistuspiste ja kynämäinen kohdistustyökalu robotissa.

Kohdistuksen jälkeen voitiin asentaa testeritarrain robottiin. Kiinnitys tapahtui vaivattomasti työkalunvaihtolaipan avulla ja tämän jälkeen kytkettiin pneumatiikkaletkut robotin käsivarressa oleviin pikaliittimiin. Mekaaninen asennustyö oli näiltä osin ohi ja voitiin siirtyä robotin ohjelmointiin.

6.3 Ohjelmointi

Ohjelmointi aloitettiin määrittämällä nollapiste ja koordinaatisto testilaudalta, kuten edellisessä luvussa selitettiin. Tämän jälkeen määritettiin pneumatiikkaa ohjaavien venttiilien asetukset ja luotiin koodiin valmiit funktiot pihtitarraimen avaamiselle ja sulkemiselle sekä kosketuksettoman tarraimen kytkennälle. Tämän jälkeen robotille opetettiin sen työpisteet ja liikkeet niiden välillä. Käytännössä tämä tapahtui ajamalla robotin työkalu oikeaan pisteeseen käsiohjaimella ja tallentamalla piste ja liiketyyppi ohjelmaan.

Ohjelman suoritukseen sisältyi useampia toistuvia pisteitä ja näitä hyödynnettiin mahdollisuuksien mukaan. Ja koska piirilevypidikkeiden väliset etäisyydet olivat tiedossa, pystyttiin ohjelmaan suoraan asettamaan niiden sijainnit ensimmäisen pidikkeen paikan perusteella. Täten välttyttiin käsin tehtävältä pisteiden opettamiselta robotille.

Työsyklin nopeutta ei ollut tässä vaiheessa tarkoitus optimoida. Yleisellä tasolla robotin liikkeet olivat hitaita, mikäli se oli työkappaleen välittömässä läheisyydessä ja nopeita, mikäli kyseessä oli siirtymä ilman työkappaletta. Robotin liikenopeutta rajattiin kun se lähestyi piirikorttia (tartunta- ja irrotusvaiheet ja testausvaiheen kontakti). Kun robotti liikutteli piirikorttia työalueella, sen kiihtyvyyttä rajoitettiin, jotta piirikorttiin ei kohdistuisi liian suuria voimia. Testien perusteella kiihtyvyydet eivät olleet ongelmallisia.

Robotin liikeratoihin ja asentoihin liittyen tulee myös huomioida singulariteettipisteet. Käytännössä tämä tarkoittaa tilannetta jossa robotin kyky liikuttaa työkalua halutulla tavalla katoaa, ja tämän syynä on usein robotin kaksi yhdensuuntaisessa asennossa olevaa niveltä. [Mao & al. 2013, s. 1] Tähän voidaan vaikuttaa hakemalla käsiohjauksella robotin nivelille parempi kulma.

Robotin ollessa liikkeessä, haluttiin sen myös turvallisuuden vuoksi viestivän siitä. Tätä varten robottijärjestelmään oli liitetty ns. majakka, josta syttyi valoja robotin senhetkisen tilan mukaan. Valoilla viestittiin myös tässä tapauksessa, mikäli piirikortti ei kuvitellusti läpäissyt IC-testausta.

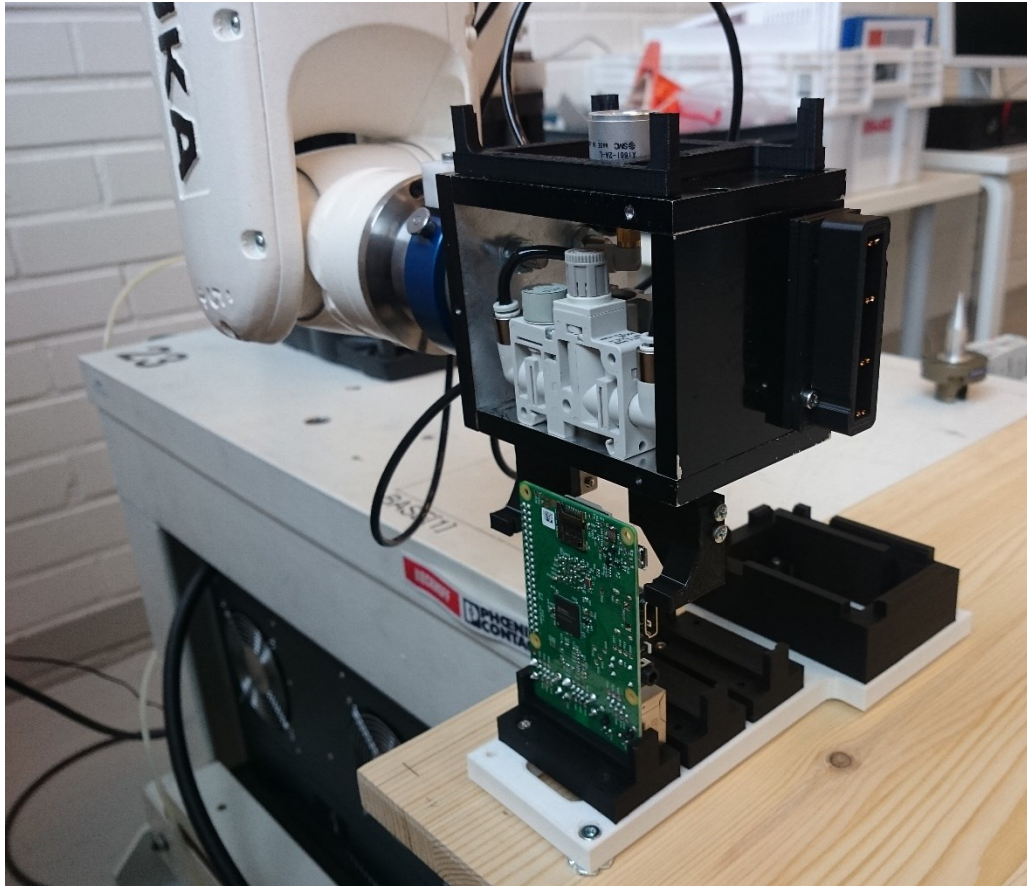
Lopullinen ohjelman ajava koodi ja koodiin liittyvä data-tiedosto löytyvät liitteistä 5 ja 6.

6.4 Työsykli

Työsykli eteni vaiheittain seuraavasti:

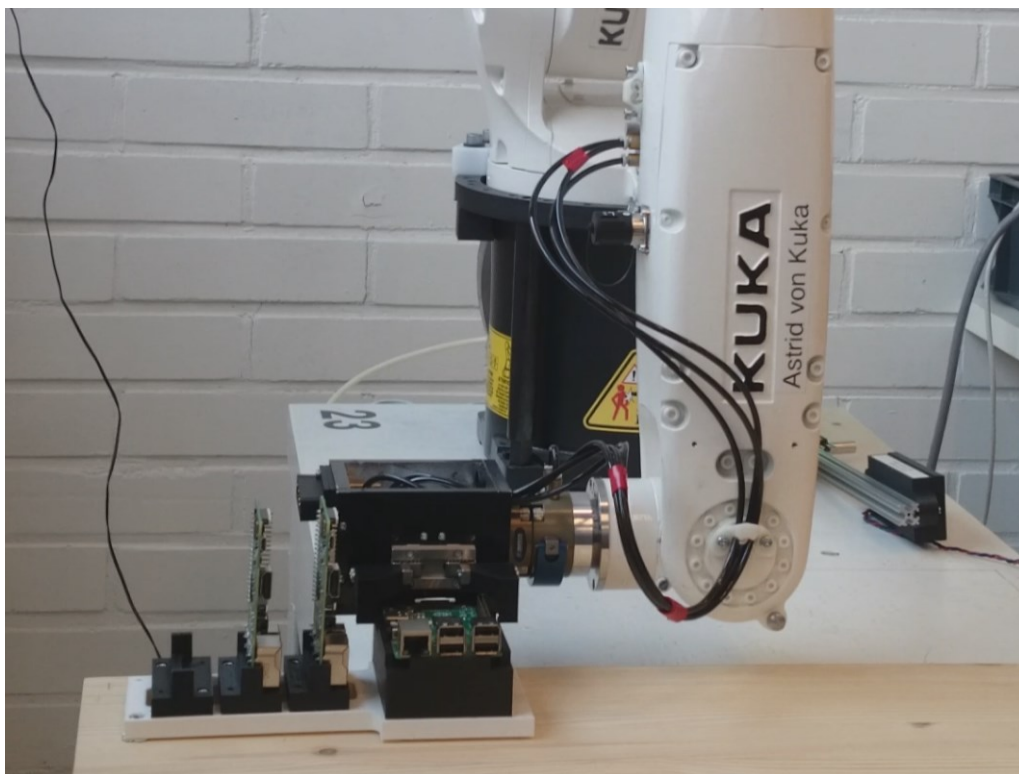
1. Pneumatiikkatoimintojen testaus
2. Piirikortin nro 1 poiminta pihtitarraimella pystytelineestä
3. Piirikortin nro 1 asettaminen testialustalle
4. Piirikortin nro 1 neulatestaus
5. Piirikortin nro 1 poiminta kosketuksettomalla tarraimella
6. Piirikortin nro 1 asettaminen koteloon
7. Piirikortin nro 2 poiminta pihtitarraimella pystytelineestä
8. Piirikortin nro 2 asettaminen testialustalle
9. Piirikortin nro 2 neulatestaus
10. Piirikortin nro 2 poiminta kosketuksettomalla tarraimella
11. Piirikortin nro 2 asettaminen koteloon
12. Piirikortin nro 3 poiminta pihtitarraimella pystytelineestä
13. Piirikortin nro 3 asettaminen testialustalle
14. Piirikortin nro 3 neulatestaus
15. Piirikortin nro 3 poimiminen testialustalta pihtitarraimella
16. Piirikortin nro 3 asettaminen takaisin pystytelineeseen.

Kuvassa 77 näkyy piirikortin poiminta pystytelineestä pihtitarraimella. Oleellista suorituksessa oli, että pihtitarrain oli keskitetty piirikortin suhteen ja piirikortin reunat olivat samassa linjassa leukojen v-urien kanssa.



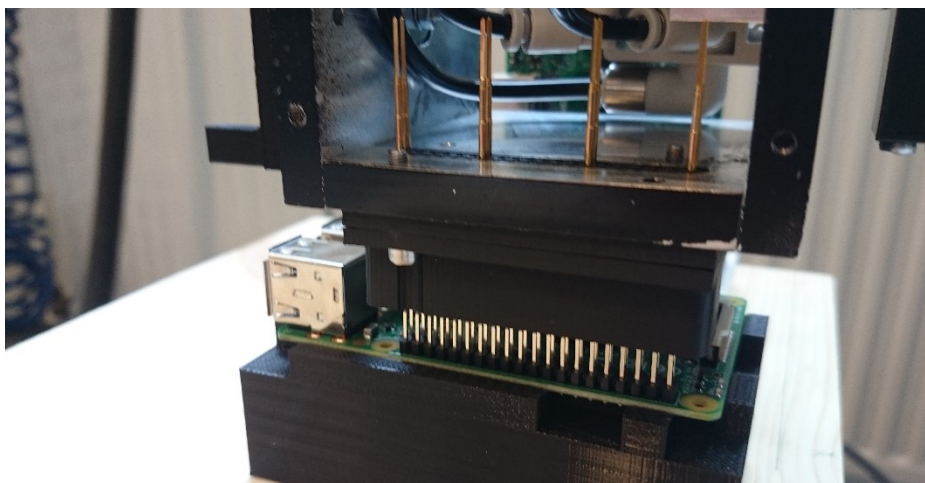
Kuva 77: Piirikortin poiminta pystytelineestä.

Piirikortti siirretään testialustalle ja noin 0.5 mm testialustan yläpuolella pihtitarraimen leuat aukeavat ja piirikortti asettuu testialusta upotukseen (kuvassa 78).



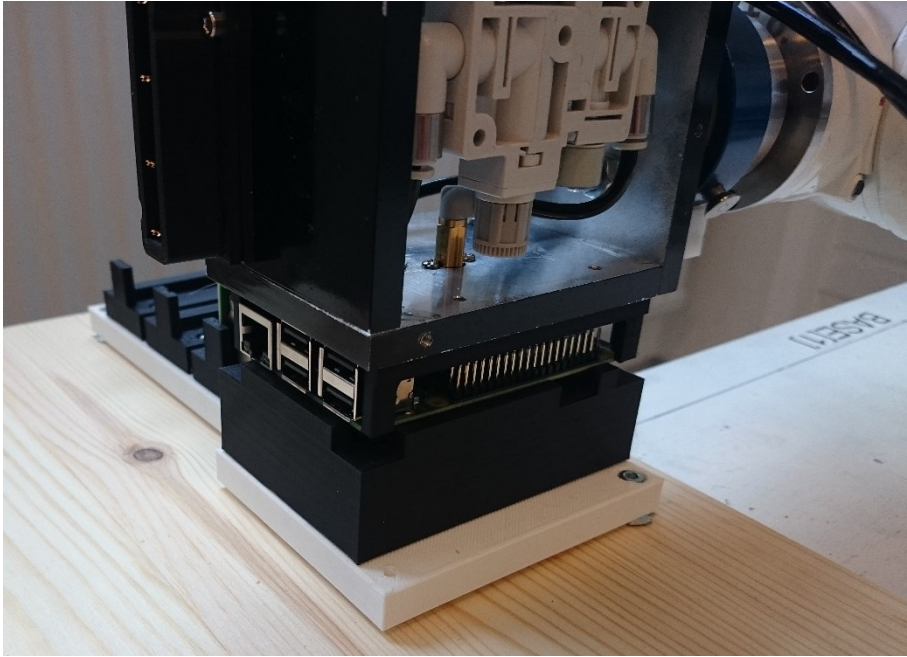
Kuva 78: Piirikortti asetetaan testialustalle.

Kuvassa 79 on esitetty neulatestauksen suoritus testialustalla. Kuvan jälkeen tapahtuva kontaktivaihe suoritetaan erittäin hitaasti, kuten myös irtautuminen piikkirimasta.



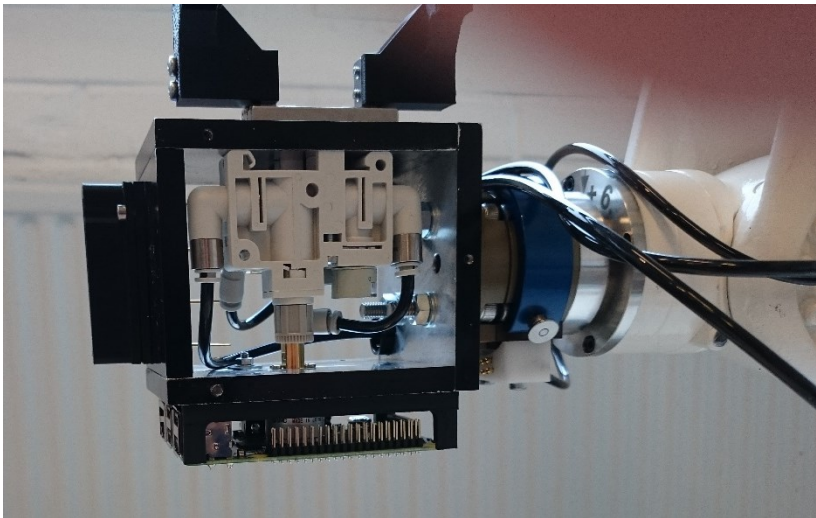
Kuva 79: Neulat kohdistettuna piirikortin piikkirimaan.

Testauksen jälkeen piirikortti poimitaan kuvan 80 mukaisesti kosketuksettomalla tarraimella.



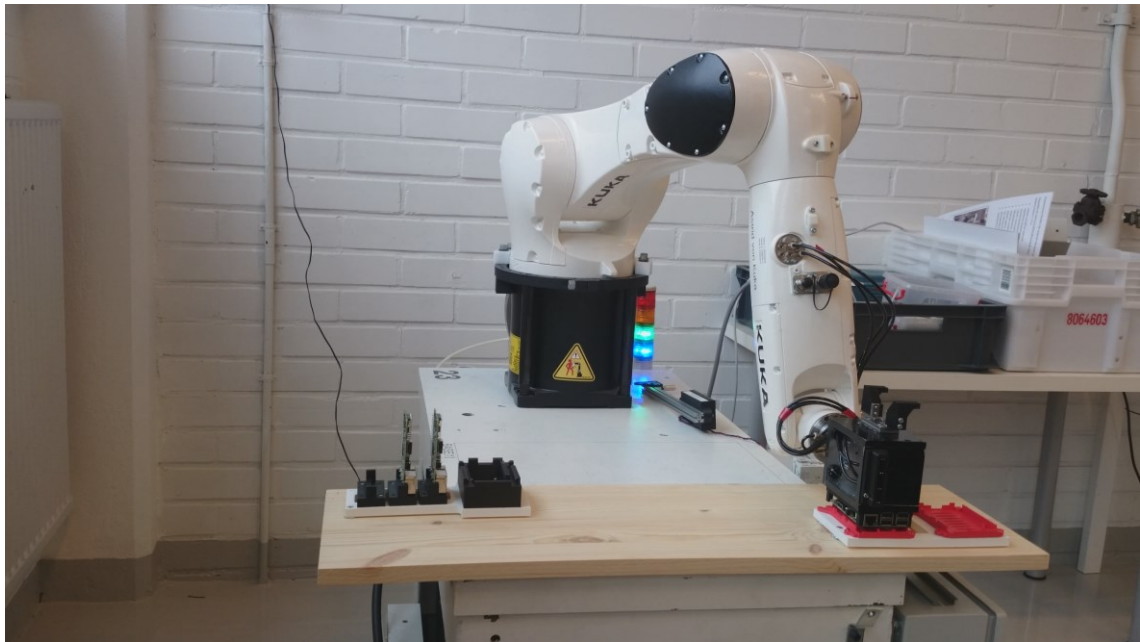
Kuva 80: Kosketukseton tarrain imee piirikortin ohjuria vasten.

Kosketukseton tarrain siirtää piirikortin koteloitua varten (kuva 81). Liike tapahtuu pääasiassa xy-tasossa, jolloin ohjuri kantaa suurimman osan liikekiihtyvyyksistä.



Kuva 81: Piirikortti siirretään koteloitavaksi.

Kuvassa 82 tapahtuu piirikortin kotelointi siten, että tarrain asettuu kotelon yläpuolelle ja piirikortin ollessa osittain kotelon sisällä kosketukseton tarrain kytetään pois päältä.



Kuva 82: Piirikortin kotelointi.

Kaksi ensimmäistä piirikorttia koteloidaan ja kolmannen ollessa ”viallinen” se palautetaan takaisin pystytelineeseen. Palautus tapahtuu siten, että piirikortti poimitaan testialustalta pihtitarraimilla ja siirretään pystytelineen uriin lähes pohjaan saakka. Pihittarrain irroittaa otteensa ja piirikortti asettuu pystytelineen pohjaan painovoiman vaikutuksesta. Kuvassa 83 piirikortti tuodaan pystytelineen läheisyyteen palautusta varten.



Kuva 83: Piirikortin palautus pystytelineeseen, tilanne hetkeä ennen pihlien avaamista.

7 Tuotteen ja konseptin testaus

Robottisolun kokoonpanon, asentamisen ja ohjelmoinnin jälkeen päästään vaiheeseen jossa testeritarrainta ja konseptin yleistä toimintaa päästään testaamaan käytännössä. Tässä luvussa kerrotaan testauksen tavoitteista, suorituksesta, tuloksista ja tuloksista tehtävistä havainnoista.

7.1 Testauksen tavoitteet

Testauksen tavoitteet voidaan ryhmitellä kahteen eri tasoon. Testeritarraimen yksittäisiin osiin ja toimintoihin liittyvien ongelmakohtien selvittäminen. Tavoitteena on saada lista konstruktion liittyvistä ongelmakohtista ja havainnoida näistä toimintojen kannalta kriittiset osat. Eli toisin sanoen pyritään selvittämään testeritarraimesta ne toiminnot ja toimintoihin liittyvät osat jotka kaipaavat jatkokehitystä.

Toisena tavoitteena on hieman yleisluontoisemmin tarkastella konseptin toimivuutta. Käytännössä tämä tapahtuu tarkkailemalla robotin työsykliä ja pohtimalla tämän pohjalta konseptin toimivuutta. Koska kyseessä on robottisolu, joka ei ole varsinaisesti kiinni tuotantolinjassa, joudutaan tämän pohjalta turvautumaan oletuksiin ja arvioihin konseptin yleisestä käyttökelpoisuudesta.

7.2 Testiasettelu

Konstruktion yksittäisten toimintojen testaaminen tapahtuu jo ennen varsinaista robotin työsyklin käynnistämistä. Robotin alustavaa ohjelmointia tehdessä kirjataan ylös toiminnot tai alitoiminnot, jotka eivät sellaisenaan lähteneet suoraan toimimaan vaan vaativat joko osien tai parametrien (esim. nopeus, paine) säätämistä. Työn lopullisena tavoitteena on kuitenkin saada suoritettua onnistunut työsykli robotilla.

Konseptin yleistä toimivuutta arvioidaan siten, että mikäli työvaiheista joku osoittautuu erityisen virheherkäksi tai siinä esiintyy menetelmään liittyvä perustavaa laatua oleva virhe, arvioidaan yleisellä tasolla onko koko konsepti syytä hylätä vai saavutetaanko konseptia muokkaamalla toimiva kokonaisuus. Varsinaista testiasettelua on tällaisenaan hankala muodostaa, sillä arviointi perustuu käytännön toimintaa tarkkailemalla ja havaintoja kirjaamalla.

Testausasettelu etenee vaiheittain seuraavasti:

- Tarraimen asennuksen suorittaminen ja siinä kohdattujen ongelmien kirjaaminen
- Tarraimen yksittäisten toimintojen testaaminen ja tarvittavien säätöjen suorittaminen osille ja parametreille
- Edellisessä vaiheessa kohdattujen ongelmien ja niiden korjaamiseksi tehtyjen toimintojen kirjaaminen
- Koko työsyklin ajo ja tarvittavien säätöjen teko ongelmatilanteissa
- Edellisen vaiheen ongelmien ja korjaustoimenpiteiden kirjaus
- Mikäli onnistunut työsykli saadaan suoritettua, ajetaan peräkkäisiä työsyklejä ja mikäli näissä esiintyy ongelmia, kirjataan ongelmat ja niiden toistuvuus ylös.

7.3 Testin tulokset

Tarraimen asennuksessa robottiin ei törmätty ongelmiin. Vaihtolaippa mahdollisti tarraimen sujuvan irrottamisen ja kiinnittämisen säätötilanteissa. Pneumatiikkaletkujen kiinnittämisen suhteen suurinta vaivaa aiheutti letkujen pujottaminen robotin rungossa oleviin kiinnikkeisiin. Tämä kirjattiin ylös, jotta testeritarraimen jatkokehityksessä asia huomioitaisiin.

Yksittäisiä toimintoja testattaessa käytiin läpi jokainen erillinen työvaihe ja siihen liittyvät toimilaitteet. Työvaiheet jaettiin osiin seuraavasti (työsyklin mukaisessa järjestyksessä):

- piirilevyn poiminta pihtitarraimella pystytelineestä
- piirilevyn asettaminen testialustalle pihtitarraimella
- testineulojen kytkeminen ja irtikytkeminen piirilevyn ollessa testiasemassa
- piirilevyn poimiminen testialustalta kosketuksettomalla tarraimella
- piirilevyn asettaminen koteloon kosketuksettomalla tarraimella
- viallisen piirilevyn poimiminen testialustalta pihtitarraimella
- viallisen piirilevyn asettaminen pystytelineeseen pihtitarraimella.

Taulukkoon 4 on kerätty yksittäisiin työvaiheisiin liittyvät ongelmat ja ongelmille suoritettut korjaustoimenpiteet. Testien suorituksen aikana havaittiin eritasoisia ongelmia, joista osa lähes harmittomia ja osa selkeästi konseptin toimivuutta haittaavia. Ongelmat luokiteltiin taulukossa 4 kahteen ryhmään; lievä (L) ja vakava (V). Ongelmat määritettiin vakaviksi, mikäli ne aiheuttivat tilanteen jossa robotin ajo jouduttiin keskeyttämään.

Taulukko 4: Yksittäisissä työvaiheissa havaitut ongelmat ja niihin liittyvät korjaukset ja kommentit.

Työvaihe	Ongelma	Korjaustoimenpiteet/Kommentit
Piirilevyn poiminta pihtitarraimella pystytelineestä	- Tarraimen leuat eivät olleet täysin linjassa piirikortin reunojen kanssa (L)	- Tarraimen leuat sallivat pienen virheen ja keskittivät piirikortin oikealla tavalla - Oikean tartuntapisteen ohjelmointi vaatii tarkkuutta.
Piirilevyn asettaminen testialustalle pihtitarraimella	- Ei ongelmia	- Piirilevy asettui alustalle hyvin
Testineulojen kytkeminen ja irtikytkeminen piirilevyn ollessa testiasemassa	- Irtautumisvaiheessa piirilevy ”hyppäsi” neulavoimien poistuessa (L)	- Piirilevy asettui ”hypyn” jälkeen takaisin alustalle, joten ongelma ei ollut vakava, mutta huomionarvoinen - Korjaustoimenpiteenä robotin liikenopeuden vähentäminen irtautumisvaiheessa
Piirilevyn poimiminen testialustalta kosketuksettomalla tarraimella	- Piirikortti ei tarttunut poimittaessa (V) - Piirikortti ei asettunut ohjuriin kunnolla (V) - Piirikortti aiheutti äkillisen tärähdyksen asettuessaan ohjuriin (L) - Piirikortti kiilautui jumiin testialustaan (V)	- Sopivan painetason löytäminen - Ohjurin kontaktipintojen muokkaaminen - Testialustan muokkaaminen
Piirilevyn asettaminen koteloon kosketuksettomalla tarraimella	- Piirikortti ei asettunut koteloon halutulla tavalla, jäi toiselta puolelta kotelon reunaa vasten(V)	- Kotelon todettiin olevan muotoilultaan sellainen, että suoraan asettaminen ei toiminut - Kotelon mallia muokattiin - Lähestymiskulman muokkaaminen
Viallisen piirilevyn poimiminen testialustalta pihtitarraimella	- Ei ongelmia	- Ei korjattavaa
Viallisen piirilevyn asettaminen pystytelineeseen pihtitarraimella	- Ei ongelmia	- Ei korjattavaa

Korjausten jälkeen ajettiin tarkistukseksi muutamia kokonaisia työsyklejä ja tehtiin pieniä säätöjä robotin ohjelmointipisteisiin sekä kiihtyvyyksiin. Näiden toimenpiteiden jälkeen suoritettiin toistokokeet ajamalla kokonaista työsykliä läpi 24 kertaa ja kirjaamalla näissä esiintyneet ongelmat ylös. Yhteensä toistokokeessa suoritettiin seuraavat toiminnot:

- 72 kpl piirikortin poimintaa pystytelineestä pihtitarraimella
- 72 kpl piirikortin asettamista testialustalle pihtitarraimella
- 72 kpl neulatestausta
- 48 kpl piirikortin poimimista testialustalta kosketuksettomalla tarraimella
- 48 kpl piirikortin asettamista koteloon kosketuksettomalla tarraimella
- 24 kpl piirikortin poimimista testialustalta pihtitarraimella
- 24 kpl piirikortin asettamista pystytelineeseen pihtitarraimella.

Toistokokeessa työsykleistä neljä oli sellaisia, että tapahtui virhe, joka olisi oikeassa tilanteessa johtanut robotin toiminnan keskeytymiseen. Kolme näistä virhetilanteista johtui siitä, että kosketukseton tarrain ei saanut kiinni piirikortista ja piirikortti jäi testialustalle. Yksi virhetilanne muodostui, kun piirikortti asettui kosketuksettoman tarraimen ohjuriin voimakkaasti tärähtäen ja tärähdys liikutti pystytelineessä ollutta piirikorttia vinoon. Tämä olisi johtanut piirikortin hajoamiseen, mikäli sitä olisi yritetty pihtitarraimella pystytelineestä poimia. Taulukossa 5 on esitetty tarkempi tilastitietoa toistokokeiden aikana ilmenneistä lievistä ja vakavista ongelmatilanteista. Esiintyvyyssprosentit on laskettu yksittäisiin toimintoihin suhteutettuna, sillä osa yksittäisistä toiminnoista tapahtui työsyklin aikana useampia kertoja.

Taulukko 5: Toistokokeissa esiintyneet virheet

Ongelma	Esiintyvyys toistokokeessa (%)
Kosketukseton tarrain ei saanut otetta piirikortista (johti keskeytykseen)	6,25
Piirikortti tärähti asettuessaan ohjuriin (ei johtanut keskeytykseen)	16,70
Piirikortti tärähti asettuessaan ohjuriin (johti keskeytykseen)	2,08
Piirikortti ei asettunut ohjuriin suorassa (ei johtanut keskeytykseen)	18,75
Testineuloja nostettaessa piirikortti ”hyppäsi” (ei johtanut keskeytykseen)	15,28

Kokonaisista työsykleistä suoritettiin 83,3 prosenttia onnistuneesti ilman keskeytyksiä, vaikka näidenkin aikana lieviä ongelmatilanteita havaittiin. Piirikortin asettuminen ohjuriin huonosti ei johtanut ongelmiin koteloinnin suhteen kertaakaan ja pihtitarraimien toiminnassa ei havaittu yhtäkään virhetilannetta.

7.4 Havainnot ja johtopäätökset

Yksittäisiä toimintoja testatessa ja toistokokeiden tulosten perusteella konstruktion virhetilanteille alttein osa on kosketuksettoman tarraimen ohjuri ja toisaalta myös piirikorttia paikoillaan pitävä testialusta. Ohjuri on rakenteena sinänsä haastava, sillä piirikortin ollessa tarraimen imussa syklonivirtaus pyörittää korttia ja hankaloittaa

piirikortin asettumista ohjuriin. Testialustan suhteen tulisi pyrkiä ratkaisuun, joka samanaikaisesti paikoittaisi piirikortin tarkasti, mutta ei aiheuttaisi ongelmia irrotusvaiheessa. Sekä alustassa, että ohjurissa voisi harkita piirikortin kiinnitysreikien hyödyntämistä erityisesti paikoittamisessa.

Piirikorttien reunat eivät myöskään ole paras kohta kohdistusta vaativiin toimenpiteisiin. Valmistusvaiheessa piirikortteja on yhdellä levyllä useampi kappale, josta ne irrotetaan levyssä olevan uran tai perforointien avulla. Perforoinnissa piirilevyn reunaan on porattu vierekkäisiä reikiä, joista levy taitetaan irti. Taittaminen jättää piirilevyn reunaan epätasaisuuksia ja näitä havaittiin myös testeissä käytetyissä piirikorteissa. [Cohen 2015, s. 71]

Yksittäistesteissä kotelon geometria aiheutti ongelmia piirikortin asettumisen suhteen. Ongelma ratkaistiin muokkaamalla kotelon geometriaa siten, että piirikortti liukuisi sisään ja asettuisi paikoilleen vaikka kohdistus olisi hieman epätarkka.

Yhteenvetona testeistä voidaan todeta, että tilanteet joissa käsiteltävä kappale ei selkeästi ole muotosuljetusti hallinnassa aiheuttavat ongelmia. Robotisoitu kappaleenkäsittely ja kokoonpano asettavat myös toleranssivaatimuksia käsiteltävän kappaleen suhteen. Robotisoituun tuotantoon ja kokoonpanoon liittyen tulisi huomioida se, että tuote suunnitellaan robotisoinnin ehdoilla, mikäli näin on mahdollista tehdä.

8 Pohdinnat

Tässä luvussa käydään läpi arviot konseptin toimivuudesta yleisellä tasolla ja tarkastellaan kuinka hyvin asetetut tavoitteet saavutettiin. Näiden asioiden perusteella saadaan kuva siitä, mitkä ovat seuraavat askeleet testeritarraimen kehityksen ja konseptin suhteen. Käytännön testien tuloksia ja työtä tehdessä havaittuja asioita hyödynnetään jatkotoimenpiteitä listatessa.

8.1 Konseptin toimivuus yleisesti

Konseptin mekaniikan toteutus onnistui kappaleenkäsittelyn, neulatestauksen ja kokoonpanon osalta. Työvaiheina IC-testaus ja kokoonpano ovat toistuvia ja rutiininomaisia, joten robotisoinnin hyödyntäminen tällaisissa prosesseissa on täysin perusteltua. Robotin tarkkuus riittää piirilevyn käsittelyyn ja tarkan neulakontaktin suorittamiseen.

Toisaalta kyseessä ei ollut täysimittainen tuotantolinja, vaan pienemmän volyymin testiympäristö. Volyymin nosto toisi muutoksia paletteihin ja tulisi harkita myös erilaisia automaattisia kappaleensyöttöjärjestelmiä. Työsykli robottisolun sisällä ei tosin juurikaan muuttuisi. Robottia ajettiin testeissä myös melko rajatuilla nopeuksilla ja liittäminen osaksi tuotantolinjaa edellyttäisi liikenopeuksien kasvattamista. Nostetuilla nopeuksilla robotti olisi todennäköisesti kilpailukykyinen prosessin suorituksessa ihmiseen verrattuna.

Konseptia voi sinällään pitää onnistuneena, vaikka se onkin vielä melko varhaisessa vaiheessa kehitystään. Testivaiheessa koetut onnistumiset ja suhteellisen pieni määrä ongelmia lupaavat hyvää konseptin toimivuuden suhteen.

8.2 Onnistuminen asetettujen tavoitteiden suhteen

Työn päätavoitteena oli suunnitella ja valmistaa nivelvarsirobotille työkalu, jolla voitaisiin käsitellä, testata ja kokoonpanna sähkömekaanisia tuotteita. Tässä tavoitteessa onnistuttiin ja lopputuloksena saatiin esittelykelpoinen työkalu, joka suorittaa konseptin sisältämät toiminnot.

Testeritarraimen prototyypillä ja robotilla päästiin tavoitteiden mukaisesti tekemään myös testiajoja joiden tuloksiin oltiin tyytyväisiä. Testiajoista saatiin myös haluttua tietoa robotiikkaan ja testeritarraimen vahvuuksiin ja heikkouksiin liittyen. Näistä tiedoista on hyötyä testeritarraimen kehityksessä ja mahdollisissa tulevilla robotiikkaan liittyvissä hankkeissa. Yritykselle saatiin myös siirrettyä käytännön tason osaamista robotiikkasovelluksiin ja robottien suorituskykyyn liittyen.

Projektin perusteella saatiin myös käsitys robotin työkalusuunnittelun ja valmistuksen vaatimista resursseista. Koska prosessi vietiin teoreettisen konseptin tasolta testattavaksi prototyyppiä asti, saatiin suhteellisen kattava kuva kokonaisprosessista ja luotiin pohja tuleville saman alan projekteille. Alusta loppuun asti viety projekti tarjoaa myös mahdollisuuden arvioida liikeidean toimivuutta kustannusten ja resurssien suhteen.

Suunnitteluprojekti kehitti myös tekijänsä suunnittelutaitoja ja tarjosi yritykselle tilaisuuden kokeilla erilaisia metodeja tuotekehityksen suhteen käytännössä. Yritys sai myös esittelykelpoisen prototyypin testeritarraimesta ja videota sen toiminnasta käytännössä. Näitä tullaan hyödyntämään erilaisissa promootiotilaisuuksissa.

8.3 Jatkoimenpiteet

Testeritarraimen mekaniikan suhteen jatkotavoitteena on kehittää testivaiheessa ongelmia tuottaneita osia ja lisätä tätä kautta testeritarraimen toimintavarmuutta. Ongelmia eniten tuotti kosketuksettoman tarraimen ohjuri. Ohjurin rakennetta muokataan tai mahdollisesti käytetään jotain muuta tuotekehitysvaiheessa syntynyttä ideaa ohjurin nykyisen mallin tilalla. Testeritarraimen runkoa kehitetään kompaktimmaksi ja huolto- ja säätötoimenpiteitä varten pääsyä tarraimen sisään helpotetaan.

Testeritarraimen ja palettien suhteen yhtenä selkeänä kehityskohteena on anturoinnin hyödyntäminen. Tällä hetkellä robotti ei saa minkäänlaista palautetta testeritarraimen toiminnasta tai piirikorttien sijainneista työalueella. Anturoinnin avulla robotti pystyisi paremmin reagoimaan virhetilanteisiin ja osittain jopa korjaamaan niitä itsenäisesti.

Oleellinen osa jatkokehitystä on myös robotin työprosessiin liittyvä säätö etenkin nopeuden lisäämisen suhteen. Työsyklin viimeistelyn jälkeen olisi myös syytä tehdä tarkempi vertailu prosessin tehokkuudesta manuaalisesti suoritettavaan nähden. Tämän perusteella saataisiin alustavasti arvioitua kustannuksia ja järjestelmän takaisinmaksuaikaa, mikäli se olisi tuotantolinjaan liitettynä.

Tässä vaiheessa projekti koostui pelkästään mekaniikan suunnittelusta. IC-testauksen suhteen seuraava kehityssaskel olisi testaukseen liittyvän elektroniikan ja testausohjelman lisääminen osaksi järjestelmää. Tässä vaiheessa ei ole vielä tiedossa millaisia vaatimuksia tai haasteita testaelektroniikan lisääminen testeritarraimeen asettaa. Robotin käyttämän työkalun massa on kuitenkin rajattu, joten testerielektroniikka tulisi kaapelointia lukuun ottamatta sijoittaa muualle kuin tarraimeen.

9 Yhteenveto

Tuotannon robotisointi tulee aiheelliseksi, mikäli suoritettava työvaihe on vaarallinen, raskas tai samanlaisena lukemattomia kertoja toistuva. Tällöin on perusteltu syy harkita työntekijän korvaamista robotilla. Toisaalta myös kustannustekijät voivat tukea työvaiheiden robotisointia, sillä robotti työskentelee tauotta ja hankintakustannusten jälkeen kuluja tuottavat ainoastaan huolto- sekä energiakustannukset.

Laitehankinnoissa robotin runko ja robottiin liittyvä ohjausjärjestelmä on yleensä vakiotuote. Varsinainen sovelluskohteeseen liittyvä modifiointi tapahtuu robotin käyttämän työkalun tai työkalujen kustomoinnilla. Oleellisena osana prosessia on myös oheislaitteiden, kuten palettien ja osasyöttimien suunnittelu sovelluskohteeseen.

Tämän ajatuksen ympärille suunniteltiin konsepti nivelvarsirobotin käyttämästä testeritarraimesta, joka suorittaa piirilevyn IC-testauksen mekaaniset vaiheet, testatun tuotteen kokoonpanon ja näihin työvaiheisiin liittyvän kappaleenkäsittelyn. Tutkimuksen aiheeksi muodostui testeritarraimen suunnittelu, prototyypin rakentaminen ja testaus.

IC-testauksessa piirilevyn komponentteihin otetaan testineuloilla kontakti ja suoritetaan mittaukset valmistusvaiheessa syntyneiden virheiden löytämiseksi. Tyypillisiä virheitä piirilevyvalmistuksessa ovat muun muassa toisiinsa yhdistyneet tai katkenneet kuparivedokset sekä puuttuvat, rikkiinäiset tai väärinasennetut komponentit. Tässä työssä suoritettiin ainoastaan IC-testaukseen liittyvä mekaaninen osuus, jossa toistuvasti otettiin tarkka kontakti piirilevyssä olevaan piikkirimaan testineuloilla.

Kappaleenkäsittelyyn liittyen on tarjolla monen tyyppisiä teknisiä ratkaisuja. Tässä työssä hyödynnettiin pneumaattista pihtityyppistä tarrainta ja alipaineeseen perustuvaa kosketuksetonta tarrainta. Pihtityyppisellä tarraimella tartunta tapahtui piirikortin reunoista ja kosketuksettomalla tarraimella piirikortin pinnasta. Näiden yhdistelmällä saatiin luotua työkalu, jolla piirikortti oli helppo poimia ja helppo asentaa koteloon eri asennoissa.

Piirikortti kotelointiin testauksen jälkeen. Koteloihin ja ylipäätään robotilla käsiteltäviin tuotteisiin tulisi jo suunnitteluvaiheessa huomioida robotisoidun kokoonpanon vaatimukset. Suunnittelussa tulee ottaa huomioon muun muassa asennusta helpottavat muodot ja sopivat toleranssit.

Tuotekehityksessä edettiin systemaattisesti ja ajatustyötä edistettiin erilaisin aivoriihimenetelmin. Varsinaisen suunnittelutyön kannalta oleellisin asia oli iteratiivisin kierroksin eteneminen, jossa suunnitellusti vahvistettiin konstruktiosta löytyviä heikkouksia. Lopputuloksena päädyttiin rakenteeseen, jossa kuutiomaisen rungon sivuille

asetettiin toimilaitteet. Toimilaitteet pyrittiin sijoittamaan runkoon siten, että ne olisivat mahdollisimman hyvin runkorakenteen suojassa. Runko itsessään koostui alumiinilevyistä ja muissa osissa hyödynnettiin 3d-tulostusta soveltuvin osin esimerkiksi tarraimen leuoissa, kosketuksettoman tarraimen ohjurissa ja testineulojen alustassa.

Valmista prototyyppiä testattiin nivelvarsirobotissa ensin yksittäisten toimintojen osalta ja sen jälkeen kokonaista työsykliä toistuvasti ajamalla. Testauksen tarkoituksena oli selvittää konseptin toimivuus ja jatkokehitystä vaativat toiminnot ja osat. Toistokokeessa ilmeni, että eniten ongelmia aiheuttaa kosketukseton tarrain ja siihen liittyvä ohjuriosa. Kosketuksettoman tarraimen ongelmat ilmenivät siten, että tarrain ei hetkittäin saanut otetta piirikortista ja ohjurin suhteen ongelmia aiheutti piirikortin asettuminen siihen vinosti.

Prototyypin jatkokehityksen suhteen keskitytään testivaiheessa ilmenneiden ongelmien korjaamiseen, konstruktion yleiseen kehitykseen ja anturien lisäämiseen testeritarraimen toiminnan parantamiseksi. Konsepti itsessään vaatii myös tarkempia testejä kustannusten arvioinnin ja robotisoinnin takaisinmaksuajan suhteen. Prototyypistä itsessään saatiin esittelykelpoinen kappale promootiotarkoituksiin ja käytännön työn kautta saatiin kerättyä arvokasta tietotaitoa tuotekehityksestä ja robotiikkaan liittyvästä työkalusuunnittelusta.

Lähdeluettelo

- ABB Robotics. 2014. Small robots are the new big change. The Rapoo Case with IRB 120. Käyttäjäkertomus. [Viitattu 21.12.2015]. Saatavissa: <https://library.e.abb.com/public/41fda8c72bf04fcdc1257c94004a788d/The%20Rapoo%20Case%20with%20ABB%20IRB%20120.pdf>
- ACDI. 2011. ICT without Expensive Fixtures — ACDI Expands Capabilities with In-House Flying Probe Tester. Verkkojulkaisu. [Viitattu 21.12.2015]. Saatavissa: <http://www.acdi.com/latest-news/ict-without-expensive-fixtures-acdi-expands-capabilities-with-in-house-flying-probe-tester/>
- Alshuller, G. 2002. 40 Principles: TRIZ Keys to Technical Innovation. 1. painos. Worcester: Technical Innovation Center, Inc. 135 s. ISBN 0-9640740-3-6.
- Ardayfio, D. 1987. Fundamentals of Robotics. New York: CRC Press. 448 s. ISBN 0-8247-7440-X
- Blackwell, G. 1999. The Electronic Packaging Handbook. Florida: CRC Press. 640 s. ISBN 0-8493-8591-1.
- Brown et al. 2010. Universal robotic gripper based on the jamming of granular material. Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America. Vol. 107. No. 44. DOI10.1073/pnas.1003250107.
- Cohen, A. 2015. Prototype to Product. 1. painos. Sebastop: O'Reilly Media, Inc. 438 s. ISBN 978-1-449-36229-4.
- Festo. 2016. Basic principles of vacuum technology, brief overview. Tuote-esite. [Viitattu 3.4.2016]. Saatavissa: https://www.festo.com/net/SupportPortal/Files/286804/Basic_Vacuum_Technology_Principles.pdf
- GenRad Inc. 1984. Introduction to in-Circuit Testing. Massachusetts: Concord. 123 s.
- Ihalainen et al. 1989. Valmistustekniikka. 13. painos. Espoo: Otakustantamo. 490 s. ISBN 951-672-063.

Ingun. 2014. MA 21xx Series, All-rounder for all test applications. Tuote-esite. [Viitattu 21.12.2015]. Saatavissa: http://www.ingun.de/media/pdf/pa/Advanced_Productline_MA21xx.pdf

Ingun. 2015. Tip Style Overview. Tuote-esite. [Viitattu 21.12.2015]. Saatavissa: http://www.ingun.de/index.php?option=com_content&view=article&id=101%3Auebersicht-kopfformen&catid=42%3Atechnische-informationen&Itemid=62&lang=en

Kuivanen, R. 1999. Robotiikka. Helsinki: Talentum. 188 s. ISBN: 951-9438-58-0.

Kuka Robotics. 2013. KR AGILUS sixx With W and C Variants Operating Instructions (Version: BA KR AGILUS sixx V8 en (PDF)). Ohjekirja. 181 s.

Kuka Robotics. 2014. ENKO Staudinger yhdistää useita hitsausmenetelmiä pienikokoisessa yleissolussa. Käyttäjäkertomus. [Viitattu 21.12.2015]. Saatavissa: http://www.kuka-robotics.com/res/robotics/Solutions/PDF/FI/KUKA_ENKO_STAUDINGER_FI.pdf

Kuka Robotics. 2016. KR 6 R900 SIXX (KR AGILUS). Tuote-esittely. [Viitattu 2.4.2016]. Saatavissa: http://www.kuka-robotics.com/en/products/industrial_robots/small_robots/kr6_r900_sixx/

Lempiäinen, J. 2003. Hyvin suunniteltu – puoliksi valmistettu: lyhyt johdatus tuotteiden valmistettavuuteen ja kokoonpantavuuteen. Helsinki: Hakapaino. 180 s. ISBN 951-97329-1-8.

Mao, J., Guo, Y., Ren, J. & Guo, W. 2013. A New Euclidian Distance Based Approach to Measure Closeness to Singularity for Parallel Manipulators. Teoksessa: Lee, J., Lee, M., Liu, H. & Ryu, J-H. Intelligent Robotics and Applications. 1. painos. Busan, South Korea. 25-28.9.2013. Springer Heidelberg. s. 41-53. ISBN 978-3-642-40848-9.

Motoman. 2013. Robot streamline seat production. Käyttäjäkertomus. [Viitattu 21.12.2015]. Saatavissa: http://www.motoman.fi/index.php?id=183&no_cache=1&L=4&tx_catalogcasestudy_pi1%5Buid%5D=193

Pahl, G. & Beitz, W. 1990. Koneensuunnitteluoppi. 2. painos. Porvoo: Springer Verlag ja Metalliteollisuuden Kustannus Oy. 608 s. ISBN 951-817-468-7.

Pitkälä, M. 2006. Robotin adaptiivinen ohjaus. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, tietotekniikan osasto. Helsinki. 123 s.

Robotmation. 2015. Konepalvelusolut. Tuote-esite. [Viitattu 21.12.2015]. Saatavissa: <http://www.robotmation.fi/files/media/Konepalvelusolut-esite-2015-robotmation.pdf>

Sandin, P.E. 2003. Robot Mechanism and Mechanical Devices Illustrated. McGraw-Hill. 299 s. ISBN 007141200X.

SFS-EN ISO 10218-1. 2011. Robotit ja robotiikkalaitteet. Turvallisuusvaatimukset. Osa 1: Teollisuusrobotit. 3. painos. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 89 s.

Siciliano, B., Sciavicco, L., Villani, L. & Oriolo, G. 2009. Robotics: Modelling, Planning and Control. 1. painos. Lontoo: Springer-Verlag. 632 s. ISBN 978-1-84628-641-4.

SMC. 2015. Non-contact Gripper. Tuote-esite. [Viitattu 21.12.2015]. Saatavissa: https://content2.smcetech.com/pdf/XT661_EU.pdf

SMC. 2015. Parallel Type Air Gripper Series MHZ. Tuote-esite. [Viitattu 21.12.2015]. Saatavissa: https://content2.smcetech.com/pdf/MHZ_EU.pdf










Suomen Robotiikkayhdistys ry. 2012. Suomen teollisuusrobottilasto 2012. 5 s. (elektroninen aineisto). [Viitattu 15.9.2015]. Saatavissa: http://www.robayhd.fi/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=168&Itemid=66

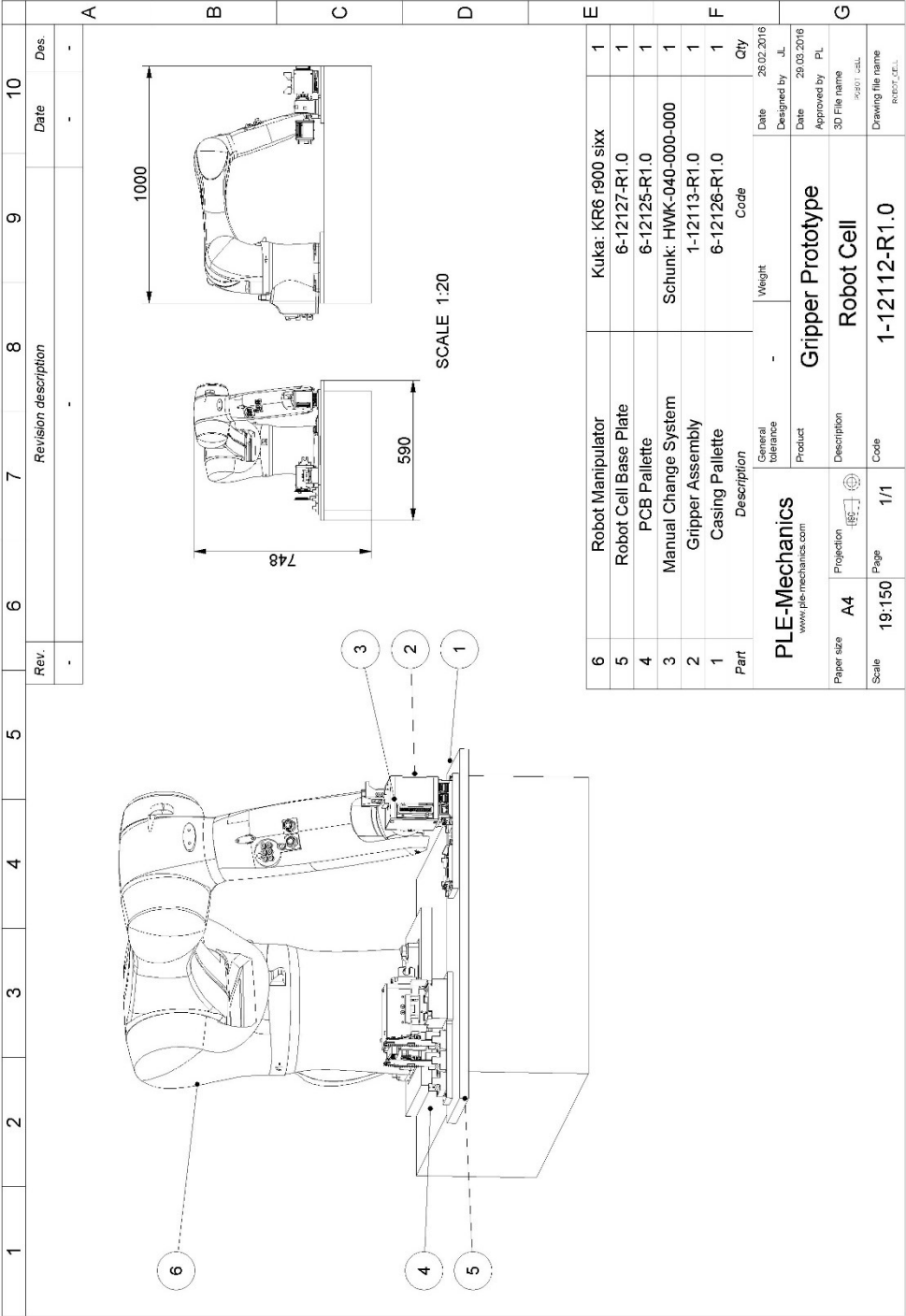
Thyssenkrupp. 2016. Alumiinien vertailutaulukko. Tuote-esite. [Viitattu: 2.4.2016]. Saatavissa: <http://www.thyssenkrupp.fi/alumiinit/alumiinit/alumiinit>

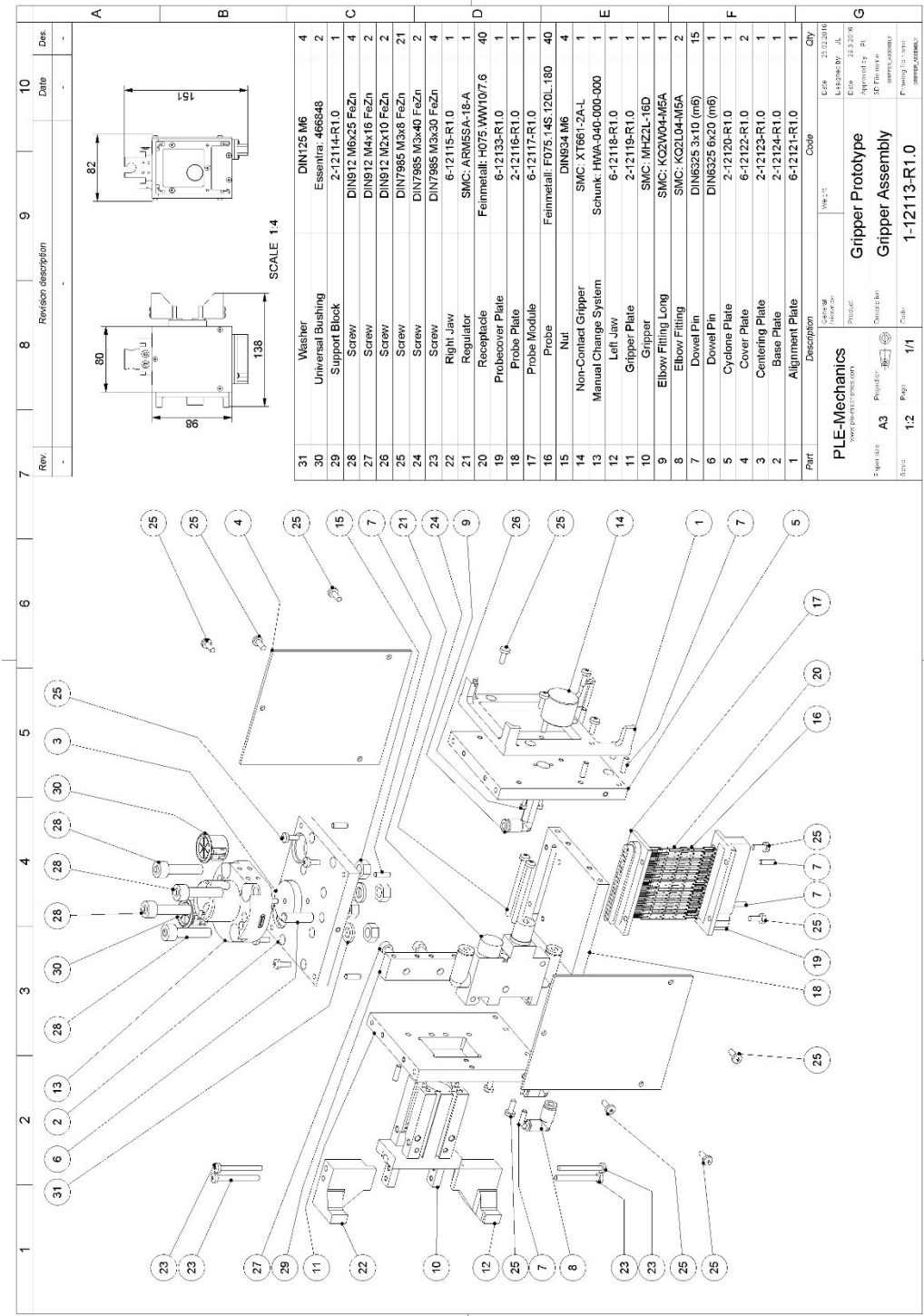
Wolf, A., Steinmann, R. & Schunk, H. 2005. Grippers in Motion: The Fascination of Automated Handling Tasks. Berliini: Springer. 242 s. ISBN 3-540-25657-1.

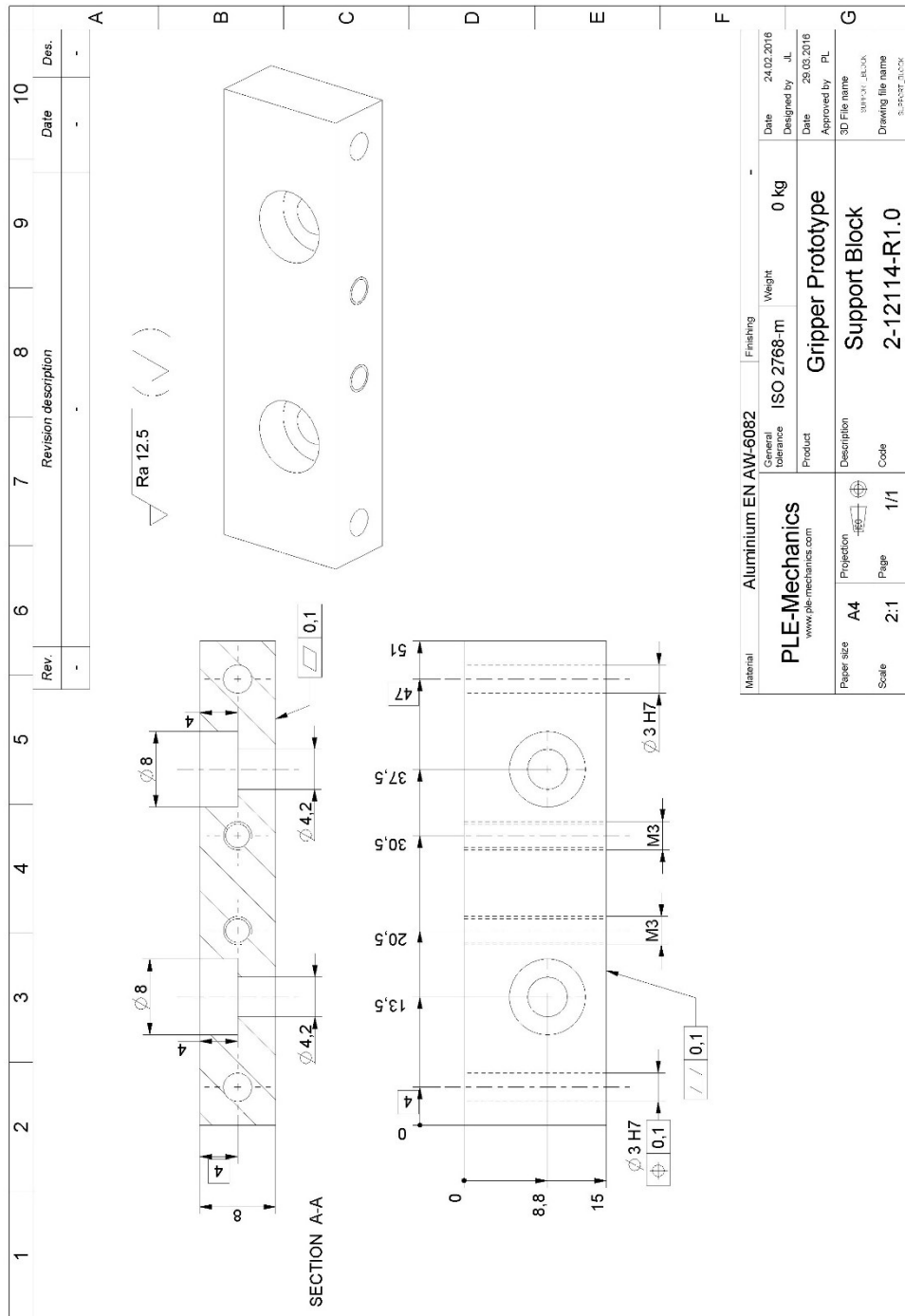
Liiteluettelo

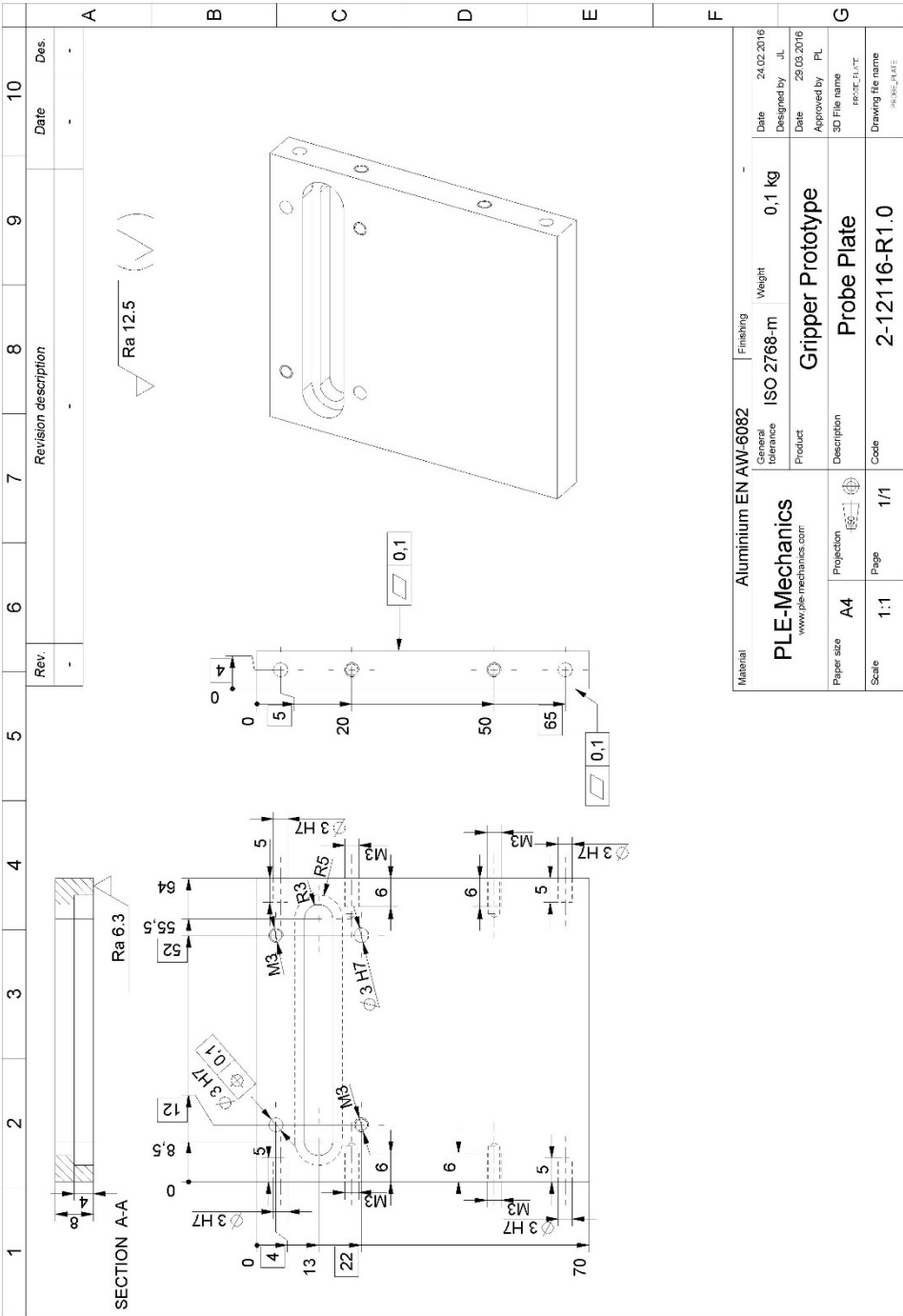
Liite 1	Morfologinen laatikko. 1 sivu.
Liite 2	Robottisolun layout. 1 sivu.
Liite 3	Testeritarraimen kokoonpanopiirustus. 1 sivu.
Liite 4	Testeritarraimen koneistuspiirustukset. 6 sivua.
Liite 5	Ohjelmakoodin suoritusosa. 10 sivua.
Liite 6	Ohjelmakoodin dataosa. 4 sivua.

Toiminto			Morfologinen laatikko			
1. Piirikorttiin tarttuminen	 1.1 Kaupallinen tarttuja, jossa muotoillut tartuntaleuat	 1.2 Kiinteä runkoi, jossa lineaarisesti liikkuvat tartuntapinnat	 1.3 Alipainetartunta piirikortin pintaan	 1.4 Tartuntakynnet, kontakti reunoihin tai kulmiin	 1.5 Tarraimen toinen leuka liikkuu lineaarijohteilla	 1.6 Haarukka ja lukitussalpa  1.7 Muotti, jossa senkkaukset ja lukitustapit  1.8 Laajenevat tarttumatapit piirikortin reikiin  1.9 Korttiin tartutaan kulmista
2. Piirikortin kohdistus	2.1 Ei erillistä kohdistusta tai keskitystä, luotetaan robotin ja osien tarkkuuteen 3.1 Neulat liikkuvat (esim. pneumaattisesti) kortin ollessa tarraimessa	2.2 Tarttumisvaiheessa muotoilu, joka keskittää piirikortin (muotosuljettu) 3.2 Kiinteät neulat, liike tapahtuu robotin avulla	2.3 Kohdistus tarkastetaan anturein 3.3 Piirikortti liikkuu ("hissi"), kiinteät neulat vastintappien liike	2.4 Toiselta puolelta muotosuljettu, toiselta puolelta jousikuormittainen kohdistus 3.4 Saksimainen neulojen ja vastintappien liike	2.5 Robotti työntää piirikortin kiinteää kohdistinta vasten 2.6 Ohjain/kohdistustapit	

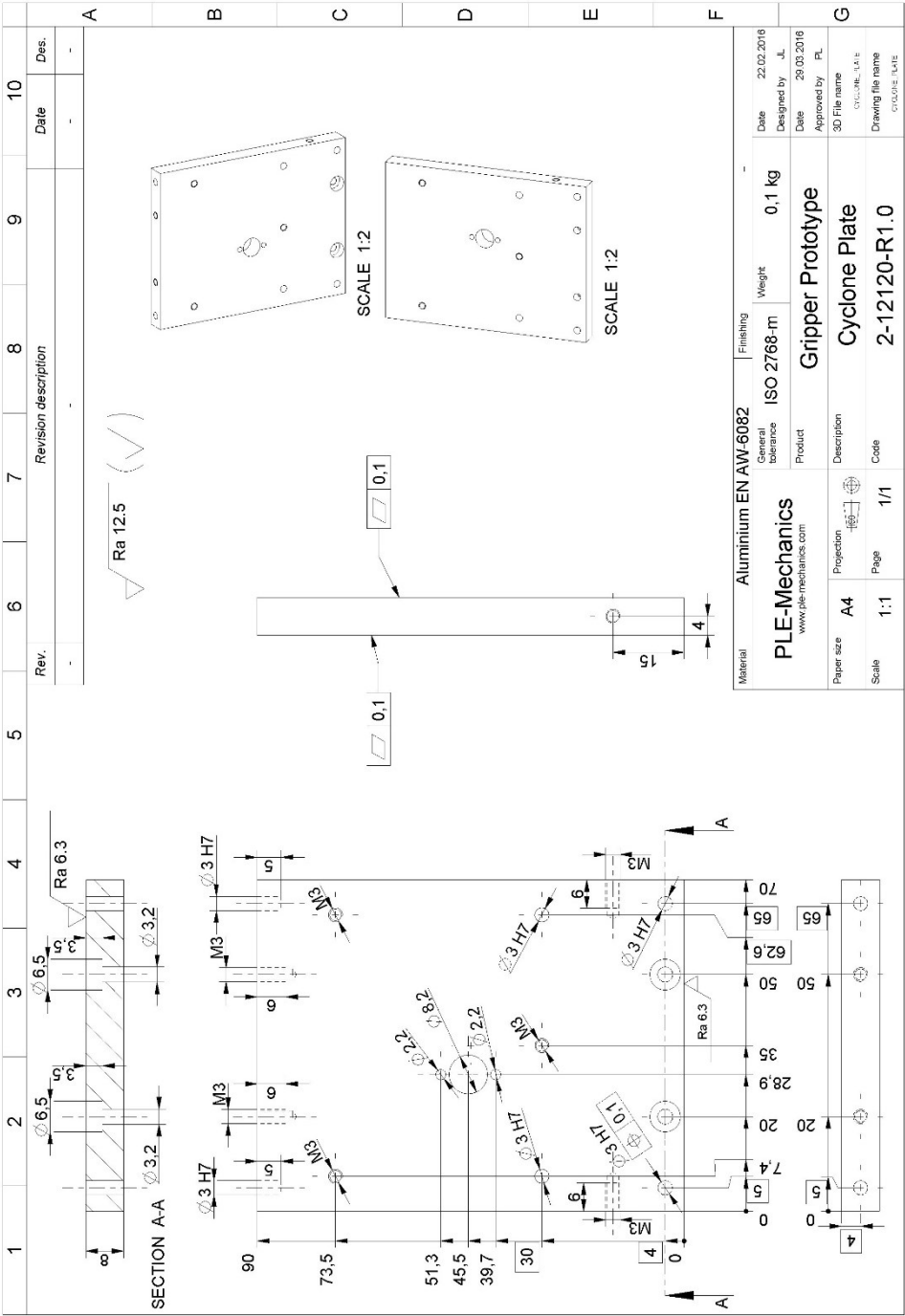













Material	Aluminium EN AW-6082			Finishing	-	Date	22.02.2016	
PLE-Mechanics www.ple-mechanics.com	General tolerance	ISO 2768-m	Weight	0,1 kg		Designed by	JL	
	Product	Gripper Prototype					Date	29.3.2016
	Description	Base Plate					Approved by	PL
	3D File name	SAC371.ME						
Paper size	A4	Projection 						
Scale	1:1	Page	1/1	Code	Drawing file name			
					BAS371_A.E			

Liite 5 (1/10)

```

&ACCESS RVP
&REL 228
&PARAM EDITMASK = *
&PARAM TEMPLATE = C:\KRC\Roboter\Template\vorgabe
&PARAM DISKPATH = KRC:\R1\Program\testitarra
DEF testil( )
;FOLD INI;{%PE}
;FOLD BASISTECH INI
    GLOBAL INTERRUPT DECL 3 WHEN $STOPMESS==TRUE DO IR_STOPM ( )
    INTERRUPT ON 3
    BAS (#INITMOV,0 )
;ENDFOLD (BASISTECH INI)
;FOLD USER INI
    ;Make your modifications here

;ENDFOLD (USER INI)
;ENDFOLD (INI)

resetLeds()
resetOutputs()

;FOLD PTP P1 Vel=50 % DEFAULT;{%PE}%R 8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VPTP,%P 1:PTP, 2:P1,
3:, 5:50, 7:DEFAULT
$BWDSTART=FALSE
PDAT_ACT=PDEFAULT
FDAT_ACT=FP1
BAS(#PTP_PARAMS,50)
PTP XP1
;ENDFOLD
redLed(TRUE)
WAIT SEC 1
grip(TRUE)
WAIT SEC 1
grip(FALSE)
WAIT SEC 1
vacuum(TRUE)
WAIT SEC 1
vacuum(FALSE)
WAIT SEC 1
redLed(FALSE)
greenLed(TRUE)

; First PCB
;FOLD PTP P2 CONT Vel=100 % PDAT1 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VPTP,%P 1:PTP, 2:P2, 3:C_DIS, 5:100, 7:PDAT1
$BWDSTART=FALSE
PDAT_ACT=PPDAT1
FDAT_ACT=FP2
BAS(#PTP_PARAMS,100)
PTP XP2 C_DIS
;ENDFOLD
;FOLD PTP P4 CONT Vel=100 % PDAT3 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VPTP,%P 1:PTP, 2:P4, 3:C_DIS, 5:100, 7:PDAT3
$BWDSTART=FALSE
PDAT_ACT=PPDAT3
FDAT_ACT=FP4
BAS(#PTP_PARAMS,100)
PTP XP4 C_DIS
;ENDFOLD
;FOLD LIN P5 Vel=0.02 m/s CPDAT1 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VLIN,%P 1:LIN, 2:P5, 3:, 5:0.02, 7:CPDAT1
$BWDSTART=FALSE
LDAT_ACT=LCPDAT1
FDAT_ACT=FP5
BAS(#CP_PARAMS,0.02)
LIN XP5
;ENDFOLD
grip(TRUE)
;FOLD LIN P7 CONT Vel=0.02 m/s CPDAT2 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VLIN,%P 1:LIN, 2:P7, 3:C_DIS C_DIS, 5:0.02, 7:CPDAT2
$BWDSTART=FALSE
LDAT_ACT=LCPDAT2
FDAT_ACT=FP7
BAS(#CP_PARAMS,0.02)
LIN XP7 C_DIS C_DIS

```

Liite 5 (2/10)

```

;ENDFOLD
;FOLD LIN P8 CONT Vel=1 m/s CPDAT3 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VLIN,%P 1:LIN, 2:P8, 3:C_DIS C_DIS, 5:1, 7:CPDAT3
$BWDSTART=FALSE
LDAT_ACT=LCPDAT3
FDAT_ACT=FP8
BAS(#CP_PARAMS,1)
LIN XP8 C_DIS C_DIS
;ENDFOLD
;FOLD LIN P9 CONT Vel=1 m/s CPDAT4 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VLIN,%P 1:LIN, 2:P9, 3:C_DIS C_DIS, 5:1, 7:CPDAT4
$BWDSTART=FALSE
LDAT_ACT=LCPDAT4
FDAT_ACT=FP9
BAS(#CP_PARAMS,1)
LIN XP9 C_DIS C_DIS
;ENDFOLD
;FOLD LIN P10 Vel=0.02 m/s CPDAT5 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VLIN,%P 1:LIN, 2:P10, 3:, 5:0.02, 7:CPDAT5
$BWDSTART=FALSE
LDAT_ACT=LCPDAT5
FDAT_ACT=FP10
BAS(#CP_PARAMS,0.02)
LIN XP10
;ENDFOLD
grip(FALSE)
;FOLD LIN P12 CONT Vel=1 m/s CPDAT7 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VLIN,%P 1:LIN, 2:P12, 3:C_DIS C_DIS, 5:1, 7:CPDAT7
$BWDSTART=FALSE
LDAT_ACT=LCPDAT7
FDAT_ACT=FP12
BAS(#CP_PARAMS,1)
LIN XP12 C_DIS C_DIS
;ENDFOLD
;FOLD PTP P13 CONT Vel=100 % PDAT5 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VPTP,%P 1:PTP, 2:P13, 3:C_DIS, 5:100, 7:PDAT5
$BWDSTART=FALSE
PDAT_ACT=PPDAT5
FDAT_ACT=FP13
BAS(#PTP_PARAMS,100)
PTP XP13 C_DIS
;ENDFOLD
;FOLD LIN P14 CONT Vel=1 m/s CPDAT8 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VLIN,%P 1:LIN, 2:P14, 3:C_DIS C_DIS, 5:1, 7:CPDAT8
$BWDSTART=FALSE
LDAT_ACT=LCPDAT8
FDAT_ACT=FP14
BAS(#CP_PARAMS,1)
LIN XP14 C_DIS C_DIS
;ENDFOLD
;FOLD LIN P15 Vel=0.005 m/s CPDAT9 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VLIN,%P 1:LIN, 2:P15, 3:, 5:0.005, 7:CPDAT9
$BWDSTART=FALSE
LDAT_ACT=LCPDAT9
FDAT_ACT=FP15
BAS(#CP_PARAMS,0.005)
LIN XP15
;ENDFOLD
greenLed(FALSE)
yellowLed(TRUE)
WAIT SEC 5
greenLed(TRUE)
yellowLed(FALSE)
blueLed(TRUE)
;FOLD LIN P17 CONT Vel=0.005 m/s CPDAT10 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VLIN,%P 1:LIN, 2:P17, 3:C_DIS C_DIS, 5:0.005, 7:CPDAT10
$BWDSTART=FALSE
LDAT_ACT=LCPDAT10
FDAT_ACT=FP17
BAS(#CP_PARAMS,0.005)
LIN XP17 C_DIS C_DIS
;ENDFOLD
;FOLD PTP P18 CONT Vel=100 % PDAT7 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VPTP,%P 1:PTP, 2:P18, 3:C_DIS, 5:100, 7:PDAT7

```

Liite 5 (3/10)

```

$BWDSTART=FALSE
PDAT_ACT=PPDAT7
FDAT_ACT=FP18
BAS(#PTP_PARAMS,100)
PTP XP18 C_DIS
;ENDFOLD
;FOLD PTP P19 CONT Vel=100 % PDAT8 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VPTP,%P 1:PTP, 2:P19, 3:C_DIS, 5:100, 7:PDAT8
$BWDSTART=FALSE
PDAT_ACT=PPDAT8
FDAT_ACT=FP19
BAS(#PTP_PARAMS,100)
PTP XP19 C_DIS
;ENDFOLD
;FOLD PTP P20 CONT Vel=100 % PDAT9 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VPTP,%P 1:PTP, 2:P20, 3:C_DIS, 5:100, 7:PDAT9
$BWDSTART=FALSE
PDAT_ACT=PPDAT9
FDAT_ACT=FP20
BAS(#PTP_PARAMS,100)
PTP XP20 C_DIS
;ENDFOLD
;FOLD LIN P21 Vel=1 m/s CPDAT11 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VLIN,%P 1:LIN, 2:P21, 3:, 5:1, 7:CPDAT11
$BWDSTART=FALSE
LDAT_ACT=LCPDAT11
FDAT_ACT=FP21
BAS(#CP_PARAMS,1)
LIN XP21
;ENDFOLD
vacuum(TRUE)
;FOLD LIN P22 Vel=0.005 m/s CPDAT12 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VLIN,%P 1:LIN, 2:P22, 3:, 5:0.005, 7:CPDAT12
$BWDSTART=FALSE
LDAT_ACT=LCPDAT12
FDAT_ACT=FP22
BAS(#CP_PARAMS,0.005)
LIN XP22
;ENDFOLD
WAIT SEC 1
;FOLD LIN P23 CONT Vel=1 m/s CPDAT13 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VLIN,%P 1:LIN, 2:P23, 3:C_DIS C_DIS, 5:1, 7:CPDAT13
$BWDSTART=FALSE
LDAT_ACT=LCPDAT13
FDAT_ACT=FP23
BAS(#CP_PARAMS,1)
LIN XP23 C_DIS C_DIS
;ENDFOLD
;FOLD LIN P24 CONT Vel=1 m/s CPDAT14 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VLIN,%P 1:LIN, 2:P24, 3:C_DIS C_DIS, 5:1, 7:CPDAT14
$BWDSTART=FALSE
LDAT_ACT=LCPDAT14
FDAT_ACT=FP24
BAS(#CP_PARAMS,1)
LIN XP24 C_DIS C_DIS
;ENDFOLD
;FOLD LIN P25 CONT Vel=1 m/s CPDAT15 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VLIN,%P 1:LIN, 2:P25, 3:C_DIS C_DIS, 5:1, 7:CPDAT15
$BWDSTART=FALSE
LDAT_ACT=LCPDAT15
FDAT_ACT=FP25
BAS(#CP_PARAMS,1)
LIN XP25 C_DIS C_DIS
;ENDFOLD
;FOLD LIN P26 Vel=0.005 m/s CPDAT16 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VLIN,%P 1:LIN, 2:P26, 3:, 5:0.005, 7:CPDAT16
$BWDSTART=FALSE
LDAT_ACT=LCPDAT16
FDAT_ACT=FP26
BAS(#CP_PARAMS,0.005)
LIN XP26
;ENDFOLD
vacuum(FALSE)
WAIT SEC 1

```

Liite 5 (4/10)

```

blueLed(FALSE)
;FOLD LIN P27 CONT Vel=0.005 m/s CPDAT17 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VLIN,%P 1:LIN, 2:P27, 3:C_DIS C_DIS, 5:0.005, 7:CPDAT17
$BWDSTART=FALSE
LDAT_ACT=LCPDAT17
FDAT_ACT=FP27
BAS(#CP_PARAMS,0.005)
LIN XP27 C_DIS C_DIS
;ENDFOLD
;FOLD LIN P28 CONT Vel=1 m/s CPDAT18 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VLIN,%P 1:LIN, 2:P28, 3:C_DIS C_DIS, 5:1, 7:CPDAT18
$BWDSTART=FALSE
LDAT_ACT=LCPDAT18
FDAT_ACT=FP28
BAS(#CP_PARAMS,1)
LIN XP28 C_DIS C_DIS
;ENDFOLD

; Second PCB pickX+=35.6 mm and placeX+=107.2 mm
;FOLD PTP P2 CONT Vel=100 % PDAT1 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VPTP,%P 1:PTP, 2:P2, 3:C_DIS, 5:100, 7:PDAT1
$BWDSTART=FALSE
PDAT_ACT=PPDAT1
FDAT_ACT=FP2
BAS(#PTP_PARAMS,100)
PTP XP2 C_DIS
;ENDFOLD

;FOLD PTP P52 CONT Vel=100 % PDAT16 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VPTP,%P 1:PTP, 2:P52, 3:C_DIS, 5:100, 7:PDAT16
$BWDSTART=FALSE
PDAT_ACT=PPDAT16
FDAT_ACT=FP52
BAS(#PTP_PARAMS,100)
PTP XP52 C_DIS
;ENDFOLD
;FOLD LIN P29 Vel=0.02 m/s CPDAT19 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VLIN,%P 1:LIN, 2:P29, 3:, 5:0.02, 7:CPDAT19
$BWDSTART=FALSE
LDAT_ACT=LCPDAT19
FDAT_ACT=FP29
BAS(#CP_PARAMS,0.02)
LIN XP29
;ENDFOLD
grip(TRUE)
;FOLD LIN P53 CONT Vel=1 m/s CPDAT28 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VLIN,%P 1:LIN, 2:P53, 3:C_DIS C_DIS, 5:1, 7:CPDAT28
$BWDSTART=FALSE
LDAT_ACT=LCPDAT28
FDAT_ACT=FP53
BAS(#CP_PARAMS,1)
LIN XP53 C_DIS C_DIS
;ENDFOLD
;FOLD LIN P8 CONT Vel=1 m/s CPDAT3 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VLIN,%P 1:LIN, 2:P8, 3:C_DIS C_DIS, 5:1, 7:CPDAT3
$BWDSTART=FALSE
LDAT_ACT=LCPDAT3
FDAT_ACT=FP8
BAS(#CP_PARAMS,1)
LIN XP8 C_DIS C_DIS
;ENDFOLD

;FOLD LIN P9 CONT Vel=1 m/s CPDAT4 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VLIN,%P 1:LIN, 2:P9, 3:C_DIS C_DIS, 5:1, 7:CPDAT4
$BWDSTART=FALSE
LDAT_ACT=LCPDAT4
FDAT_ACT=FP9
BAS(#CP_PARAMS,1)
LIN XP9 C_DIS C_DIS
;ENDFOLD
;FOLD LIN P10 Vel=0.02 m/s CPDAT5 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VLIN,%P 1:LIN, 2:P10, 3:, 5:0.02, 7:CPDAT5
$BWDSTART=FALSE
LDAT_ACT=LCPDAT5

```

Liite 5 (5/10)

```

FDAT_ACT=FP10
BAS(#CP_PARAMS,0.02)
LIN XP10
;ENDFOLD
grip(FALSE)
;FOLD LIN P12 CONT Vel=1 m/s CPDAT7 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VLIN,%P 1:LIN, 2:P12, 3:C_DIS C_DIS, 5:1, 7:CPDAT7
$BWDSTART=FALSE
LDAT_ACT=LCPDAT7
FDAT_ACT=FP12
BAS(#CP_PARAMS,1)
LIN XP12 C_DIS C_DIS
;ENDFOLD
;FOLD PTP P13 CONT Vel=100 % PDAT5 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VPTP,%P 1:PTP, 2:P13, 3:C_DIS, 5:100, 7:PDAT5
$BWDSTART=FALSE
PDAT_ACT=PPDAT5
FDAT_ACT=FP13
BAS(#PTP_PARAMS,100)
PTP XP13 C_DIS
;ENDFOLD
;FOLD LIN P14 CONT Vel=1 m/s CPDAT8 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VLIN,%P 1:LIN, 2:P14, 3:C_DIS C_DIS, 5:1, 7:CPDAT8
$BWDSTART=FALSE
LDAT_ACT=LCPDAT8
FDAT_ACT=FP14
BAS(#CP_PARAMS,1)
LIN XP14 C_DIS C_DIS
;ENDFOLD
;FOLD LIN P15 Vel=0.005 m/s CPDAT9 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VLIN,%P 1:LIN, 2:P15, 3:, 5:0.005, 7:CPDAT9
$BWDSTART=FALSE
LDAT_ACT=LCPDAT9
FDAT_ACT=FP15
BAS(#CP_PARAMS,0.005)
LIN XP15
;ENDFOLD
greenLed(FALSE)
yellowLed(TRUE)
WAIT SEC 5
greenLed(TRUE)
yellowLed(FALSE)
blueLed(TRUE)
;FOLD LIN P17 CONT Vel=0.005 m/s CPDAT10 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VLIN,%P 1:LIN, 2:P17, 3:C_DIS C_DIS, 5:0.005, 7:CPDAT10
$BWDSTART=FALSE
LDAT_ACT=LCPDAT10
FDAT_ACT=FP17
BAS(#CP_PARAMS,0.005)
LIN XP17 C_DIS C_DIS
;ENDFOLD
;FOLD PTP P18 CONT Vel=100 % PDAT7 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VPTP,%P 1:PTP, 2:P18, 3:C_DIS, 5:100, 7:PDAT7
$BWDSTART=FALSE
PDAT_ACT=PPDAT7
FDAT_ACT=FP18
BAS(#PTP_PARAMS,100)
PTP XP18 C_DIS
;ENDFOLD
;FOLD PTP P19 CONT Vel=100 % PDAT8 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VPTP,%P 1:PTP, 2:P19, 3:C_DIS, 5:100, 7:PDAT8
$BWDSTART=FALSE
PDAT_ACT=PPDAT8
FDAT_ACT=FP19
BAS(#PTP_PARAMS,100)
PTP XP19 C_DIS
;ENDFOLD
;FOLD PTP P20 CONT Vel=100 % PDAT9 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VPTP,%P 1:PTP, 2:P20, 3:C_DIS, 5:100, 7:PDAT9
$BWDSTART=FALSE
PDAT_ACT=PPDAT9
FDAT_ACT=FP20
BAS(#PTP_PARAMS,100)
PTP XP20 C_DIS

```

Liite 5 (6/10)

```

;ENDFOLD
;FOLD LIN P21 CONT Vel=0.05 m/s CPDAT11 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VLIN,%P 1:LIN, 2:P21, 3:C_DIS C_DIS, 5:0.05, 7:CPDAT11
$BWDSTART=FALSE
LDAT_ACT=LCPDAT11
FDAT_ACT=FP21
BAS(#CP_PARAMS,0.05)
LIN XP21 C_DIS C_DIS
;ENDFOLD
vacuum(TRUE)
;FOLD LIN P22 Vel=0.005 m/s CPDAT12 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VLIN,%P 1:LIN, 2:P22, 3:, 5:0.005, 7:CPDAT12
$BWDSTART=FALSE
LDAT_ACT=LCPDAT12
FDAT_ACT=FP22
BAS(#CP_PARAMS,0.005)
LIN XP22
;ENDFOLD
WAIT SEC 1
;FOLD LIN P23 CONT Vel=1 m/s CPDAT13 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VLIN,%P 1:LIN, 2:P23, 3:C_DIS C_DIS, 5:1, 7:CPDAT13
$BWDSTART=FALSE
LDAT_ACT=LCPDAT13
FDAT_ACT=FP23
BAS(#CP_PARAMS,1)
LIN XP23 C_DIS C_DIS
;ENDFOLD
;FOLD LIN P24 CONT Vel=1 m/s CPDAT14 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VLIN,%P 1:LIN, 2:P24, 3:C_DIS C_DIS, 5:1, 7:CPDAT14
$BWDSTART=FALSE
LDAT_ACT=LCPDAT14
FDAT_ACT=FP24
BAS(#CP_PARAMS,1)
LIN XP24 C_DIS C_DIS
;ENDFOLD
;FOLD LIN P325 CONT Vel=1 m/s CPDAT15 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VLIN,%P 1:LIN, 2:P325, 3:C_DIS C_DIS, 5:1, 7:CPDAT15
$BWDSTART=FALSE
LDAT_ACT=LCPDAT15
FDAT_ACT=FP325
BAS(#CP_PARAMS,1)
LIN XP325 C_DIS C_DIS
;ENDFOLD
;FOLD LIN P326 Vel=0.005 m/s CPDAT16 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VLIN,%P 1:LIN, 2:P326, 3:, 5:0.005, 7:CPDAT16
$BWDSTART=FALSE
LDAT_ACT=LCPDAT16
FDAT_ACT=FP26
BAS(#CP_PARAMS,0.005)
LIN XP326
;ENDFOLD
vacuum(FALSE)
WAIT SEC 1
blueLed(FALSE)
;FOLD LIN P327 CONT Vel=1 m/s CPDAT17 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VLIN,%P 1:LIN, 2:P327, 3:C_DIS C_DIS, 5:1, 7:CPDAT17
$BWDSTART=FALSE
LDAT_ACT=LCPDAT17
FDAT_ACT=FP327
BAS(#CP_PARAMS,1)
LIN XP327 C_DIS C_DIS
;ENDFOLD
;FOLD LIN P328 CONT Vel=1 m/s CPDAT18 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VLIN,%P 1:LIN, 2:P328, 3:C_DIS C_DIS, 5:1, 7:CPDAT18
$BWDSTART=FALSE
LDAT_ACT=LCPDAT18
FDAT_ACT=FP328
BAS(#CP_PARAMS,1)
LIN XP328 C_DIS C_DIS
;ENDFOLD

; Third PCB
;FOLD PTP P2 CONT Vel=100 % PDAT1 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VPTP,%P 1:PTP, 2:P2, 3:C_DIS, 5:100, 7:PDAT1

```

Liite 5 (7/10)

```

$BWDSTART=FALSE
PDAT_ACT=PPDAT1
FDAT_ACT=FP2
BAS(#PTP_PARAMS,100)
PTP XP2 C_DIS
;ENDFOLD
;FOLD PTP P44 CONT Vel=100 % PDAT3 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VPTP,%P 1:PTP, 2:P44, 3:C_DIS, 5:100, 7:PDAT3
$BWDSTART=FALSE
PDAT_ACT=PPDAT3
FDAT_ACT=FP44
BAS(#PTP_PARAMS,100)
PTP XP44 C_DIS
;ENDFOLD
;FOLD LIN P45 Vel=0.02 m/s CPDAT1 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VLIN,%P 1:LIN, 2:P45, 3:, 5:0.02, 7:CPDAT1
$BWDSTART=FALSE
LDAT_ACT=LCPDAT1
FDAT_ACT=FP45
BAS(#CP_PARAMS,0.02)
LIN XP45
;ENDFOLD
grip(TRUE)
;FOLD LIN P47 CONT Vel=1 m/s CPDAT2 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VLIN,%P 1:LIN, 2:P47, 3:C_DIS C_DIS, 5:1, 7:CPDAT2
$BWDSTART=FALSE
LDAT_ACT=LCPDAT2
FDAT_ACT=FP47
BAS(#CP_PARAMS,1)
LIN XP47 C_DIS C_DIS
;ENDFOLD
;FOLD LIN P48 CONT Vel=1 m/s CPDAT3 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VLIN,%P 1:LIN, 2:P48, 3:C_DIS C_DIS, 5:1, 7:CPDAT3
$BWDSTART=FALSE
LDAT_ACT=LCPDAT3
FDAT_ACT=FP48
BAS(#CP_PARAMS,1)
LIN XP48 C_DIS C_DIS
;ENDFOLD
;FOLD LIN P9 CONT Vel=1 m/s CPDAT4 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VLIN,%P 1:LIN, 2:P9, 3:C_DIS C_DIS, 5:1, 7:CPDAT4
$BWDSTART=FALSE
LDAT_ACT=LCPDAT4
FDAT_ACT=FP9
BAS(#CP_PARAMS,1)
LIN XP9 C_DIS C_DIS
;ENDFOLD
;FOLD LIN P10 Vel=0.02 m/s CPDAT5 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VLIN,%P 1:LIN, 2:P10, 3:, 5:0.02, 7:CPDAT5
$BWDSTART=FALSE
LDAT_ACT=LCPDAT5
FDAT_ACT=FP10
BAS(#CP_PARAMS,0.02)
LIN XP10
;ENDFOLD
grip(FALSE)
;FOLD LIN P12 CONT Vel=1 m/s CPDAT7 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VLIN,%P 1:LIN, 2:P12, 3:C_DIS C_DIS, 5:1, 7:CPDAT7
$BWDSTART=FALSE
LDAT_ACT=LCPDAT7
FDAT_ACT=FP12
BAS(#CP_PARAMS,1)
LIN XP12 C_DIS C_DIS
;ENDFOLD
;FOLD PTP P13 CONT Vel=100 % PDAT5 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VPTP,%P 1:PTP, 2:P13, 3:C_DIS, 5:100, 7:PDAT5
$BWDSTART=FALSE
PDAT_ACT=PPDAT5
FDAT_ACT=FP13
BAS(#PTP_PARAMS,100)
PTP XP13 C_DIS
;ENDFOLD
;FOLD LIN P14 CONT Vel=1 m/s CPDAT8 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VLIN,%P 1:LIN, 2:P14, 3:C_DIS C_DIS, 5:1, 7:CPDAT8

```


Liite 5 (8/10)

```

$BWDSTART=FALSE
LDAT_ACT=LCPDAT8
FDAT_ACT=FP14
BAS(#CP_PARAMS,1)
LIN XP14 C_DIS C_DIS
;ENDFOLD
;FOLD LIN P15 Vel=0.005 m/s CPDAT9 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VLIN,%P 1:LIN, 2:P15, 3:, 5:0.005, 7:CPDAT9
$BWDSTART=FALSE
LDAT_ACT=LCPDAT9
FDAT_ACT=FP15
BAS(#CP_PARAMS,0.005)
LIN XP15
;ENDFOLD
greenLed(FALSE)
yellowLed(TRUE)
WAIT SEC 5
greenLed(TRUE)
yellowLed(FALSE)
whiteLed(TRUE)
;FOLD LIN P17 CONT Vel=0.005 m/s CPDAT10 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VLIN,%P 1:LIN, 2:P17, 3:C_DIS C_DIS, 5:0.005, 7:CPDAT10
$BWDSTART=FALSE
LDAT_ACT=LCPDAT10
FDAT_ACT=FP17
BAS(#CP_PARAMS,0.005)
LIN XP17 C_DIS C_DIS
;ENDFOLD
;FOLD LIN P32 CONT Vel=1 m/s CPDAT21 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VLIN,%P 1:LIN, 2:P32, 3:C_DIS C_DIS, 5:1, 7:CPDAT21
$BWDSTART=FALSE
LDAT_ACT=LCPDAT21
FDAT_ACT=FP32
BAS(#CP_PARAMS,1)
LIN XP32 C_DIS C_DIS
;ENDFOLD
;FOLD PTP P33 CONT Vel=100 % PDAT11 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VPTP,%P 1:PTP, 2:P33, 3:C_DIS, 5:100, 7:PDAT11
$BWDSTART=FALSE
PDAT_ACT=PPDAT11
FDAT_ACT=FP33
BAS(#PTP_PARAMS,100)
PTP XP33 C_DIS
;ENDFOLD
;FOLD PTP P36 CONT Vel=100 % PDAT12 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VPTP,%P 1:PTP, 2:P36, 3:C_DIS, 5:100, 7:PDAT12
$BWDSTART=FALSE
PDAT_ACT=PPDAT12
FDAT_ACT=FP36
BAS(#PTP_PARAMS,100)
PTP XP36 C_DIS
;ENDFOLD
;FOLD LIN P39 CONT Vel=1 m/s CPDAT22 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VLIN,%P 1:LIN, 2:P39, 3:C_DIS C_DIS, 5:1, 7:CPDAT22
$BWDSTART=FALSE
LDAT_ACT=LCPDAT22
FDAT_ACT=FP39
BAS(#CP_PARAMS,1)
LIN XP39 C_DIS C_DIS
;ENDFOLD
;FOLD LIN P40 Vel=0.02 m/s CPDAT23 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VLIN,%P 1:LIN, 2:P40, 3:, 5:0.02, 7:CPDAT23
$BWDSTART=FALSE
LDAT_ACT=LCPDAT23
FDAT_ACT=FP40
BAS(#CP_PARAMS,0.02)
LIN XP40
;ENDFOLD
grip(TRUE)

;FOLD LIN P41 CONT Vel=0.02 m/s CPDAT24 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VLIN,%P 1:LIN, 2:P41, 3:C_DIS C_DIS, 5:0.02, 7:CPDAT24
$BWDSTART=FALSE
LDAT_ACT=LCPDAT24

```

Liite 5 (9/10)

```

FDAT_ACT=FP41
BAS(#CP_PARAMS,0.02)
LIN XP41 C_DIS C_DIS
;ENDFOLD
;FOLD PTP P42 CONT Vel=100 % PDAT13 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VPTP,%P 1:PTP, 2:P42, 3:C_DIS, 5:100, 7:PDAT13
$BWDSTART=FALSE
PDAT_ACT=PPDAT13
FDAT_ACT=FP42
BAS(#PTP_PARAMS,100)
PTP XP42 C_DIS
;ENDFOLD
;FOLD PTP P43 CONT Vel=100 % PDAT14 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VPTP,%P 1:PTP, 2:P43, 3:C_DIS, 5:100, 7:PDAT14
$BWDSTART=FALSE
PDAT_ACT=PPDAT14
FDAT_ACT=FP43
BAS(#PTP_PARAMS,100)
PTP XP43 C_DIS
;ENDFOLD
;FOLD PTP P46 CONT Vel=100 % PDAT15 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VPTP,%P 1:PTP, 2:P46, 3:C_DIS, 5:100, 7:PDAT15
$BWDSTART=FALSE
PDAT_ACT=PPDAT15
FDAT_ACT=FP46
BAS(#PTP_PARAMS,100)
PTP XP46 C_DIS
;ENDFOLD
;FOLD LIN P49 CONT Vel=1 m/s CPDAT25 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VLIN,%P 1:LIN, 2:P49, 3:C_DIS C_DIS, 5:1, 7:CPDAT25
$BWDSTART=FALSE
LDAT_ACT=LCPDAT25
FDAT_ACT=FP49
BAS(#CP_PARAMS,1)
LIN XP49 C_DIS C_DIS
;ENDFOLD
;FOLD LIN P50 Vel=0.02 m/s CPDAT26 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VLIN,%P 1:LIN, 2:P50, 3:, 5:0.02, 7:CPDAT26
$BWDSTART=FALSE
LDAT_ACT=LCPDAT26
FDAT_ACT=FP50
BAS(#CP_PARAMS,0.02)
LIN XP50
;ENDFOLD
grip(FALSE)

;FOLD LIN P51 CONT Vel=0.02 m/s CPDAT27 Tool[1]:nolla Base[5]:testilauta;{%PE}%R
8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VLIN,%P 1:LIN, 2:P51, 3:C_DIS C_DIS, 5:0.02, 7:CPDAT27
$BWDSTART=FALSE
LDAT_ACT=LCPDAT27
FDAT_ACT=FP51
BAS(#CP_PARAMS,0.02)
LIN XP51 C_DIS C_DIS
;ENDFOLD
;FOLD PTP P1 CONT Vel=100 % DEFAULT;{%PE}%R 8.3.22,%MKUKATPBASIS,%CMOVE,%VPTP,%P 1:PTP,
2:P1, 3:C_DIS, 5:100, 7:DEFAULT
$BWDSTART=FALSE
PDAT_ACT=PDEFAULT
FDAT_ACT=FP1
BAS(#PTP_PARAMS,100)
PTP XP1 C_DIS
;ENDFOLD
resetLeds()
redLed(TRUE)
END
DEF grip(closed:IN)
DECL BOOL closed
$OUT[7]=closed
$OUT[10]=NOT closed
WAIT SEC 0.5
END
DEF vacuum(enabled:IN)
DECL BOOL enabled
$OUT[8]=NOT enabled

```

Liite 5 (10/10)

```
$OUT[11]=enabled
;WAIT SEC 1
END
DEF resetLeds()
$OUT[2201]=FALSE
$OUT[2202]=FALSE
$OUT[2203]=FALSE
$OUT[2204]=FALSE
$OUT[2205]=FALSE
END
DEF resetOutputs()
$OUT[7] = FALSE
$OUT[8] = TRUE
$OUT[10] = TRUE
$OUT[11] = FALSE
END
DEF redLed(on:IN)
DECL BOOL on
$OUT[2201]=on
END
DEF yellowLed(on:IN)
DECL BOOL on
$OUT[2202]=on
END
DEF greenLed(on:IN)
DECL BOOL on
$OUT[2203]=on
END
DEF blueLed(on:IN)
DECL BOOL on
$OUT[2204]=on
END
DEF whiteLed(on:IN)
DECL BOOL on
$OUT[2205]=on
END
```

Liite 6 (1/4)

```

&ACCESS RVP
&REL 228
&PARAM EDITMASK = *
&PARAM TEMPLATE = C:\KRC\Roboter\Template\vorgabe
&PARAM DISKPATH = KRC:\R1\Program\testitarrain
DEFDAT testil
;FOLD EXTERNAL DECLARATIONS;%{PE}%MKUKATPBASIS,%CEXT,%VCOMMON,%P
;FOLD BASISTECH EXT;%{PE}%MKUKATPBASIS,%CEXT,%VEXT,%P
EXT BAS (BAS_COMMAND :IN,REAL :IN )
DECL INT SUCCESS
;ENDFOLD (BASISTECH EXT)
;FOLD USER EXT;%{E}%MKUKATPUSER,%CEXT,%VEXT,%P
;Make your modifications here

;ENDFOLD (USER EXT)
;ENDFOLD (EXTERNAL DECLARATIONS)
DECL E6AXIS XP1={A1 0.0,A2 -105.000,A3 105.000,A4 0.0,A5 90.0000,A6 0.0,E1 0.0,E2 0.0,E3
0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL FDAT FP1={TOOL_NO 1,BASE_NO 5,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL BASIS_SUGG_T_LAST_BASIS={POINT1[] "P53",POINT2[] "P53
",CP_PARAMS[] "CPDAT28",PTP_PARAMS[] "PDAT16",CONT[]
"C_DIS C_DIS",CP_VEL[] "1",PTP_VEL[] "100
",SYNC_PARAMS[] "SYNCDAT",SPL_NAME[] "S0",A_PARAMS[]
"ADATO"}
DECL E6POS XP2={X 274.813782,Y 54.5023499,Z -413.126,A -177.101028,B -68.2226105,C
89.0266266,S 6,T 18,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL FDAT FP2={TOOL_NO 1,BASE_NO 5,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL PDAT PPDAT1={VEL 100.000,ACC 20.0000,APO_DIST 100.000,APO_MODE #CDIS,GEAR_JERK
50.0000}
DECL E6POS XP4={X 58.1693764,Y 60.8111343,Z -222.817612,A -178.132294,B -67.7539063,C
89.0880737,S 6,T 18,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL E6POS XP34={X 93.7693787,Y 60.8111343,Z -222.817612,A -178.132294,B -67.7539063,C
89.0880737,S 6,T 18,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL E6POS XP44={X 129.369385,Y 60.8111343,Z -222.817612,A -178.132294,B -67.7539063,C
89.0880737,S 6,T 18,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL FDAT FP4={TOOL_NO 1,BASE_NO 5,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL PDAT PPDAT3={VEL 100.000,ACC 20.0000,APO_DIST 10.0000,APO_MODE #CDIS,GEAR_JERK
50.0000}
DECL E6POS XP5={X 58.1693764,Y 60.4971390,Z -171.504929,A -178.132294,B -67.7539063,C
89.0880737,S 6,T 18,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL E6POS XP35={X 93.7693787,Y 60.4971390,Z -171.504929,A -178.132294,B -67.7539063,C
89.0880737,S 6,T 18,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL E6POS XP45={X 129.371628,Y 59.0603676,Z -171.513718,A -178.132294,B -67.7539063,C
89.0880737,S 6,T 18,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL FDAT FP5={TOOL_NO 1,BASE_NO 5,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL LDAT LCPDAT1={VEL 2.00000,ACC 20.0000,APO_DIST 100.000,APO_FAC 50.0000,AXIS_VEL
100.000,AXIS_ACC 100.000,ORI_TYP #VAR,CIRC_TYP #BASE,JERK_FAC 50.0000,GEAR_JERK
50.0000,EXAX_IGN 0}
DECL E6POS XP7={X 58.1693764,Y 61.3247337,Z -306.750244,A -178.132294,B -67.7539063,C
89.0880737,S 6,T 18,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL E6POS XP37={X 93.7693787,Y 61.3247337,Z -306.750244,A -178.132294,B -67.7539063,C
89.0880737,S 6,T 18,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL E6POS XP47={X 129.369385,Y 61.3247337,Z -306.750244,A -178.132294,B -67.7539063,C
89.0880737,S 6,T 18,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL FDAT FP7={TOOL_NO 1,BASE_NO 5,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL LDAT LCPDAT2={VEL 2.00000,ACC 20.0000,APO_DIST 100.000,APO_FAC 50.0000,AXIS_VEL
100.000,AXIS_ACC 100.000,ORI_TYP #VAR,CIRC_TYP #BASE,JERK_FAC 50.0000,GEAR_JERK
50.0000,EXAX_IGN 0}
DECL E6POS XP8={X 164.793106,Y 61.4356804,Z -306.749573,A -0.426748395,B -21.8593063,C -
88.6157074,S 6,T 50,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL E6POS XP38={X 93.7693787,Y 61.3247375,Z -306.750244,A -0.426748395,B -21.8593063,C -
88.6157074,S 6,T 50,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL E6POS XP48={X 129.369385,Y 61.3247375,Z -306.750244,A -0.426748395,B -21.8593063,C -
88.6157074,S 6,T 50,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL FDAT FP8={TOOL_NO 1,BASE_NO 5,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL LDAT LCPDAT3={VEL 2.00000,ACC 20.0000,APO_DIST 100.000,APO_FAC 50.0000,AXIS_VEL
100.000,AXIS_ACC 100.000,ORI_TYP #VAR,CIRC_TYP #BASE,JERK_FAC 50.0000,GEAR_JERK
50.0000,EXAX_IGN 0}
DECL E6POS XP9={X 167.725677,Y -56.9067802,Z -97.0283051,A 91.4309616,B -22.1971035,C -
89.8392487,S 6,T 58,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL FDAT FP9={TOOL_NO 1,BASE_NO 5,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL LDAT LCPDAT4={VEL 2.00000,ACC 20.0000,APO_DIST 100.000,APO_FAC 50.0000,AXIS_VEL
100.000,AXIS_ACC 100.000,ORI_TYP #VAR,CIRC_TYP #BASE,JERK_FAC 50.0000,GEAR_JERK
50.0000,EXAX_IGN 0}

```

Liite 6 (2/4)

```

DECL E6POS XP10={X 167.725677,Y -57.0895500,Z -67.1599655,A 91.4309616,B -22.1971035,C -
89.8392487,S 6,T 58,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL FDAT FP10={TOOL_NO 1,BASE_NO 5,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL LDAT LCPDAT5={VEL 2.00000,ACC 20.0000,APO_DIST 100.000,APO_FAC 50.0000,AXIS_VEL
100.000,AXIS_ACC 100.000,ORI_TYP #VAR,CIRC_TYP #BASE,JERK_FAC 50.0000,GEAR_JERK
50.0000,EXAX_IGN 0}
DECL LDAT LCPDAT7={VEL 2.00000,ACC 20.0000,APO_DIST 100.000,APO_FAC 50.0000,AXIS_VEL
100.000,AXIS_ACC 100.000,ORI_TYP #VAR,CIRC_TYP #BASE,JERK_FAC 50.0000,GEAR_JERK
50.0000,EXAX_IGN 0}
DECL E6POS XP12={X 167.725677,Y -55.7183609,Z -291.187286,A 91.4308929,B -22.1970959,C -
89.8391800,S 6,T 58,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL FDAT FP12={TOOL_NO 1,BASE_NO 5,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL E6POS XP13={X 182.780594,Y 33.1828766,Z -265.194855,A -111.665192,B -0.306760401,C -
0.842841864,S 2,T 10,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL FDAT FP13={TOOL_NO 1,BASE_NO 5,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL PDAT PPDAT5={VEL 100.000,ACC 20.0000,APO_DIST 100.000,APO_MODE #CDIS,GEAR_JERK
50.0000}
DECL E6POS XP14={X 177.411026,Y 44.3267822,Z -126.221390,A -111.367165,B -0.306264430,C -
0.841613531,S 2,T 10,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL FDAT FP14={TOOL_NO 1,BASE_NO 5,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL LDAT LCPDAT8={VEL 2.00000,ACC 20.0000,APO_DIST 100.000,APO_FAC 50.0000,AXIS_VEL
100.000,AXIS_ACC 100.000,ORI_TYP #VAR,CIRC_TYP #BASE,JERK_FAC 50.0000,GEAR_JERK
50.0000,EXAX_IGN 0}
DECL E6POS XP15={X 177.411026,Y 44.2528801,Z -114.145081,A -111.367165,B -0.306264430,C -
0.841613531,S 2,T 10,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL FDAT FP15={TOOL_NO 1,BASE_NO 5,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL LDAT LCPDAT9={VEL 2.00000,ACC 20.0000,APO_DIST 100.000,APO_FAC 50.0000,AXIS_VEL
100.000,AXIS_ACC 100.000,ORI_TYP #VAR,CIRC_TYP #BASE,JERK_FAC 50.0000,GEAR_JERK
50.0000,EXAX_IGN 0}
DECL E6POS XP17={X 177.411026,Y 44.3359718,Z -127.723495,A -111.367165,B -0.306264430,C -
0.841613531,S 2,T 10,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL FDAT FP17={TOOL_NO 1,BASE_NO 5,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL LDAT LCPDAT10={VEL 2.00000,ACC 20.0000,APO_DIST 100.000,APO_FAC 50.0000,AXIS_VEL
100.000,AXIS_ACC 100.000,ORI_TYP #VAR,CIRC_TYP #BASE,JERK_FAC 50.0000,GEAR_JERK
50.0000,EXAX_IGN 0}
DECL E6POS XP18={X 177.411026,Y 45.2321281,Z -274.173,A -111.367165,B -0.306264430,C -
0.841613531,S 2,T 10,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL FDAT FP18={TOOL_NO 1,BASE_NO 5,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL PDAT PPDAT7={VEL 100.000,ACC 20.0000,APO_DIST 100.000,APO_MODE #CDIS,GEAR_JERK
50.0000}
DECL E6POS XP19={X 179.551086,Y 40.2462311,Z -257.978790,A 68.2503662,B -0.204696059,C
1.05293405,S 2,T 42,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL FDAT FP19={TOOL_NO 1,BASE_NO 5,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL PDAT PPDAT8={VEL 100.000,ACC 20.0000,APO_DIST 100.000,APO_MODE #CDIS,GEAR_JERK
50.0000}
DECL E6POS XP20={X 174.905167,Y 53.2793388,Z -288.122,A 0.612167716,B 67.7826843,C -
90.8043594,S 6,T 50,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL FDAT FP20={TOOL_NO 1,BASE_NO 5,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL PDAT PPDAT9={VEL 100.000,ACC 20.0000,APO_DIST 100.000,APO_MODE #CDIS,GEAR_JERK
50.0000}
DECL E6POS XP21={X 169.807114,Y 50.5083809,Z -107.575478,A -0.113819964,B 67.5403,C -
91.4959183,S 6,T 50,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL FDAT FP21={TOOL_NO 1,BASE_NO 5,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL LDAT LCPDAT11={VEL 2.00000,ACC 20.0000,APO_DIST 100.000,APO_FAC 50.0000,AXIS_VEL
100.000,AXIS_ACC 100.000,ORI_TYP #VAR,CIRC_TYP #BASE,JERK_FAC 50.0000,GEAR_JERK
50.0000,EXAX_IGN 0}
DECL E6POS XP22={X 170.269012,Y 51.2251854,Z -98.5097885,A 1.34068322,B 67.4356461,C -
89.9213409,S 6,T 50,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL FDAT FP22={TOOL_NO 1,BASE_NO 5,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL LDAT LCPDAT12={VEL 2.00000,ACC 20.0000,APO_DIST 100.000,APO_FAC 50.0000,AXIS_VEL
100.000,AXIS_ACC 100.000,ORI_TYP #VAR,CIRC_TYP #BASE,JERK_FAC 50.0000,GEAR_JERK
50.0000,EXAX_IGN 0}
DECL E6POS XP23={X 170.269897,Y 51.7022781,Z -133.055145,A 1.46573722,B 67.3313904,C -
89.7849274,S 6,T 50,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL FDAT FP23={TOOL_NO 1,BASE_NO 5,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL LDAT LCPDAT13={VEL 2.00000,ACC 20.0000,APO_DIST 100.000,APO_FAC 50.0000,AXIS_VEL
100.000,AXIS_ACC 100.000,ORI_TYP #VAR,CIRC_TYP #BASE,JERK_FAC 50.0000,GEAR_JERK
50.0000,EXAX_IGN 0}
DECL E6POS XP24={X 592.975891,Y 157.025452,Z -195.513290,A 1.46573734,B 67.3313904,C -
89.7849274,S 6,T 59,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL FDAT FP24={TOOL_NO 1,BASE_NO 5,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL LDAT LCPDAT14={VEL 2.00000,ACC 20.0000,APO_DIST 100.000,APO_FAC 50.0000,AXIS_VEL
100.000,AXIS_ACC 100.000,ORI_TYP #VAR,CIRC_TYP #BASE,JERK_FAC 50.0000,GEAR_JERK
50.0000,EXAX_IGN 0}

```

Liite 6 (3/4)

```

DECL E6POS XP25={X 597.429626,Y 159.246140,Z -99.6206589,A 0.542496204,B 66.4918213,C -
90.7814178,S 6,T 59,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL E6POS XP325={X 704.629639,Y 159.246140,Z -99.6206589,A 0.542496204,B 66.4918213,C -
90.7814178,S 6,T 59,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL FDAT FP25={TOOL_NO 1,BASE_NO 5,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL LDAT LCPDAT15={VEL 2.00000,ACC 20.0000,APO_DIST 100.000,APO_FAC 50.0000,AXIS_VEL
100.000,AXIS_ACC 100.000,ORI_TYP #VAR,CIRC_TYP #BASE,JERK_FAC 50.0000,GEAR_JERK
50.0000,EXAX_IGN 0}
DECL E6POS XP26={X 597.429626,Y 159.123398,Z -79.5624695,A 0.688548505,B 66.1457214,C -
90.7852936,S 6,T 59,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL E6POS XP326={X 704.629639,Y 159.123398,Z -79.5624695,A 0.688548505,B 66.1457214,C -
90.7852936,S 6,T 59,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL FDAT FP26={TOOL_NO 1,BASE_NO 5,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL LDAT LCPDAT16={VEL 2.00000,ACC 20.0000,APO_DIST 100.000,APO_FAC 50.0000,AXIS_VEL
100.000,AXIS_ACC 100.000,ORI_TYP #VAR,CIRC_TYP #BASE,JERK_FAC 50.0000,GEAR_JERK
50.0000,EXAX_IGN 0}
DECL E6POS XP27={X 597.429626,Y 159.222763,Z -95.8008,A 0.722789943,B 66.0631638,C -
90.7868118,S 6,T 59,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL E6POS XP327={X 704.629639,Y 159.222763,Z -95.8008,A 0.722789943,B 66.0631638,C -
90.7868118,S 6,T 59,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL FDAT FP27={TOOL_NO 1,BASE_NO 5,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL LDAT LCPDAT17={VEL 2.00000,ACC 20.0000,APO_DIST 100.000,APO_FAC 50.0000,AXIS_VEL
100.000,AXIS_ACC 100.000,ORI_TYP #VAR,CIRC_TYP #BASE,JERK_FAC 50.0000,GEAR_JERK
50.0000,EXAX_IGN 0}
DECL E6POS XP28={X 597.477234,Y 158.946289,Z -190.489471,A 0.0968532637,B 66.5116196,C -
91.3464050,S 6,T 59,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL E6POS XP328={X 704.677246,Y 158.946289,Z -190.489471,A 0.0968532637,B 66.5116196,C -
91.3464050,S 6,T 59,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL FDAT FP28={TOOL_NO 1,BASE_NO 5,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL LDAT LCPDAT18={VEL 2.00000,ACC 20.0000,APO_DIST 100.000,APO_FAC 50.0000,AXIS_VEL
100.000,AXIS_ACC 100.000,ORI_TYP #VAR,CIRC_TYP #BASE,JERK_FAC 50.0000,GEAR_JERK
50.0000,EXAX_IGN 0}
DECL E6POS XP29={X 93.7710266,Y 59.4408684,Z -171.511398,A -178.498215,B -67.7561493,C
89.0879,S 6,T 18,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL FDAT FP29={TOOL_NO 1,BASE_NO 5,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL LDAT LCPDAT19={VEL 2.00000,ACC 20.0000,APO_DIST 100.000,APO_FAC 50.0000,AXIS_VEL
100.000,AXIS_ACC 100.000,ORI_TYP #VAR,CIRC_TYP #BASE,JERK_FAC 50.0000,GEAR_JERK
50.0000,EXAX_IGN 0}
DECL E6POS XP30={X 177.411026,Y 44.7023239,Z -187.592545,A -111.367104,B -0.308307469,C -
0.846811533,S 6,T 50,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL FDAT FP30={TOOL_NO 1,BASE_NO 5,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL LDAT LCPDAT20={VEL 2.00000,ACC 20.0000,APO_DIST 100.000,APO_FAC 50.0000,AXIS_VEL
100.000,AXIS_ACC 100.000,ORI_TYP #VAR,CIRC_TYP #BASE,JERK_FAC 50.0000,GEAR_JERK
50.0000,EXAX_IGN 0}
DECL E6POS XP31={X 161.955872,Y 53.1324348,Z -312.950623,A -99.9113922,B -66.1948166,C
93.3584,S 6,T 26,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL FDAT FP31={TOOL_NO 1,BASE_NO 5,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL PDAT PPDAT10={VEL 100.000,ACC 20.0000,APO_DIST 100.000,GEAR_JERK 50.0000}
DECL E6POS XP32={X 177.411026,Y 44.7342567,Z -192.811050,A -111.367165,B -0.306264430,C -
0.841613531,S 2,T 10,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL FDAT FP32={TOOL_NO 1,BASE_NO 5,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL LDAT LCPDAT21={VEL 2.00000,ACC 20.0000,APO_DIST 100.000,APO_FAC 50.0000,AXIS_VEL
100.000,AXIS_ACC 100.000,ORI_TYP #VAR,CIRC_TYP #BASE,JERK_FAC 50.0000,GEAR_JERK
50.0000,EXAX_IGN 0}
DECL E6POS XP33={X 177.411026,Y 44.7342567,Z -192.811050,A -90.3289871,B 21.8133221,C
89.7519455,S 2,T 34,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL FDAT FP33={TOOL_NO 1,BASE_NO 5,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL PDAT PPDAT11={VEL 100.000,ACC 20.0000,APO_DIST 100.000,APO_MODE #CDIS,GEAR_JERK
50.0000}
DECL E6POS XP36={X 169.724091,Y -39.3943672,Z -193.357025,A 90.2151337,B -24.8511047,C -
89.5204468,S 2,T 2,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL FDAT FP36={TOOL_NO 1,BASE_NO 5,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL PDAT PPDAT12={VEL 100.000,ACC 20.0000,APO_DIST 100.000,APO_MODE #CDIS,GEAR_JERK
50.0000}
DECL E6POS XP39={X 167.725677,Y -56.9506264,Z -89.8626785,A 91.4289398,B -22.1972218,C -
89.8338089,S 2,T 2,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL FDAT FP39={TOOL_NO 1,BASE_NO 5,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL LDAT LCPDAT22={VEL 2.00000,ACC 20.0000,APO_DIST 100.000,APO_FAC 50.0000,AXIS_VEL
100.000,AXIS_ACC 100.000,ORI_TYP #VAR,CIRC_TYP #BASE,JERK_FAC 50.0000,GEAR_JERK
50.0000,EXAX_IGN 0}
DECL E6POS XP40={X 167.725677,Y -57.0926552,Z -66.6526489,A 91.3470,B -22.2018414,C -
89.6136398,S 2,T 2,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL FDAT FP40={TOOL_NO 1,BASE_NO 5,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}

```

Liite 6 (4/4)

```

DECL LDAT LCPDAT23={VEL 2.00000,ACC 20.0000,APO_DIST 100.000,APO_FAC 50.0000,AXIS_VEL
100.000,AXIS_ACC 100.000,ORI_TYP #VAR,CIRC_TYP #BASE,JERK_FAC 50.0000,GEAR_JERK
50.0000,EXAX_IGN 0}
DECL E6POS XP41={X 167.733398,Y -57.1087952,Z -87.7952805,A 91.4307632,B -22.1954517,C -
89.8392105,S 2,T 2,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL FDAT FP41={TOOL_NO 1,BASE_NO 5,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL LDAT LCPDAT24={VEL 2.00000,ACC 20.0000,APO_DIST 100.000,APO_FAC 50.0000,AXIS_VEL
100.000,AXIS_ACC 100.000,ORI_TYP #VAR,CIRC_TYP #BASE,JERK_FAC 50.0000,GEAR_JERK
50.0000,EXAX_IGN 0}
DECL E6POS XP42={X 167.733398,Y -56.3602905,Z -210.115677,A 91.4307632,B -22.1954517,C -
89.8392105,S 2,T 2,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL FDAT FP42={TOOL_NO 1,BASE_NO 5,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL PDAT PPDAT13={VEL 100.000,ACC 20.0000,APO_DIST 100.000,APO_MODE #CDIS,GEAR_JERK
50.0000}
DECL E6POS XP43={X 526.999878,Y -42.7143822,Z -372.459930,A 90.8664551,B -67.8705444,C
90.6294327,S 6,T 50,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL FDAT FP43={TOOL_NO 1,BASE_NO 5,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL PDAT PPDAT14={VEL 100.000,ACC 20.0000,APO_DIST 100.000,APO_MODE #CDIS,GEAR_JERK
50.0000}
DECL E6POS XP46={X 129.333755,Y 68.7155075,Z -293.979584,A -175.072418,B -65.4662,C
84.5672302,S 6,T 18,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL FDAT FP46={TOOL_NO 1,BASE_NO 5,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL PDAT PPDAT15={VEL 100.000,ACC 20.0000,APO_DIST 100.000,APO_MODE #CDIS,GEAR_JERK
50.0000}
DECL E6POS XP49={X 125.560791,Y 60.2286301,Z -196.571945,A -178.033646,B -68.2666702,C
87.7679,S 6,T 18,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL FDAT FP49={TOOL_NO 1,BASE_NO 5,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL LDAT LCPDAT25={VEL 2.00000,ACC 20.0000,APO_DIST 100.000,APO_FAC 50.0000,AXIS_VEL
100.000,AXIS_ACC 100.000,ORI_TYP #VAR,CIRC_TYP #BASE,JERK_FAC 50.0000,GEAR_JERK
50.0000,EXAX_IGN 0}
DECL E6POS XP50={X 125.560791,Y 60.0940056,Z -174.571472,A -178.033646,B -68.2666702,C
87.7679,S 6,T 18,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL FDAT FP50={TOOL_NO 1,BASE_NO 5,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL LDAT LCPDAT26={VEL 2.00000,ACC 20.0000,APO_DIST 100.000,APO_FAC 50.0000,AXIS_VEL
100.000,AXIS_ACC 100.000,ORI_TYP #VAR,CIRC_TYP #BASE,JERK_FAC 50.0000,GEAR_JERK
50.0000,EXAX_IGN 0}
DECL E6POS XP51={X 125.560791,Y 60.4049492,Z -225.385864,A -178.033646,B -68.2666,C
87.7679062,S 6,T 18,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL FDAT FP51={TOOL_NO 1,BASE_NO 5,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL LDAT LCPDAT27={VEL 2.00000,ACC 20.0000,APO_DIST 100.000,APO_FAC 50.0000,AXIS_VEL
100.000,AXIS_ACC 100.000,ORI_TYP #VAR,CIRC_TYP #BASE,JERK_FAC 50.0000,GEAR_JERK
50.0000,EXAX_IGN 0}
DECL FDAT FP325={TOOL_NO 1,BASE_NO 5,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL FDAT FP327={TOOL_NO 1,BASE_NO 5,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL FDAT FP328={TOOL_NO 1,BASE_NO 5,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL E6POS XP52={X 93.7710266,Y 59.7551613,Z -222.872910,A -178.498215,B -67.7561493,C
89.0879,S 6,T 18,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL FDAT FP52={TOOL_NO 1,BASE_NO 5,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL PDAT PPDAT16={VEL 100.000,ACC 20.0000,APO_DIST 10.0000,APO_MODE #CDIS,GEAR_JERK
50.0000}
DECL E6POS XP53={X 93.7710266,Y 60.2682381,Z -306.719574,A -178.498215,B -67.7561493,C
89.0879,S 6,T 18,E1 0.0,E2 0.0,E3 0.0,E4 0.0,E5 0.0,E6 0.0}
DECL FDAT FP53={TOOL_NO 1,BASE_NO 5,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL LDAT LCPDAT28={VEL 2.00000,ACC 20.0000,APO_DIST 100.000,APO_FAC 50.0000,AXIS_VEL
100.000,AXIS_ACC 100.000,ORI_TYP #VAR,CIRC_TYP #BASE,JERK_FAC 50.0000,GEAR_JERK
50.0000,EXAX_IGN 0}
DECL FDAT FP44={TOOL_NO 1,BASE_NO 5,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL FDAT FP48={TOOL_NO 1,BASE_NO 5,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL FDAT FP47={TOOL_NO 1,BASE_NO 5,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
DECL FDAT FP45={TOOL_NO 1,BASE_NO 5,IPO_FRAME #BASE,POINT2[] " ",TQ_STATE FALSE}
ENDDAT

```